T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	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
Title	ANALYSIS OF THE 2013 TYPHOON YOLANDA (HAIYAN) AND SUBSEQUENT STORM SURGE
著者	高木 泰士, 三上 貴仁, 柴山 知也, 松丸 亮, Mario P. de Leon, Esteban Miguel, Nguyen Danh Thao, 中村亮太
Authors	Hiroshi TAKAGI, Takahito MIKAMI, Tomoya SHIBAYAMA, Ryo MATSUMARU, Mario de LEON, Miguel ESTEBAN, Thao Danh NGUYEN, Ryota NAKAMURA
出典	土木学会論文集B3（海洋開発）, Vol. 70, No. 2, pp. I 1206 - I 1211
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 70, No. 2, pp. I 1206 - I 1211
発行日 / Pub. date	2014, 10
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.

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 70, No. 2, I_1206-I_1211, 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

高木　泰士[1]・三上　貴仁[2]・柴山　知也[3]・松丸　亮[4]・Mario P. de Leon[5]・Esteban Miguel[6]・Nguyen Danh Thao[7]・中村亮太[8]

[1]正会員　東京工業大学准教授　国際開発工学専攻（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1）
E-mail:takagi@ide.titech.ac.jp

[2]正会員　早稲田大学講師　理工学術院（〒169-8555 新宿区新宿区大久保3-4-1）
[3]フェロー会員　早稲田大学教授　理工学術院（〒169-8555 新宿区新宿区大久保3-4-1）
[4]正会員　東洋大学教授　国際地域学部（〒112-8606 東京都文京区白山5-28-20）
[5]De La Salle University准教授 Civil Engineering Dept.（2401 Taft Avenue, 1004 Manila, Philippines ）
[6]東京大学大学院特任准教授　新領域創成科学研究科（〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1- 5）
[7]Ho Chi Minh City Univ. of Technology講師 Civil Engineering Dept.（Ly Thuong Kiet St., Dist.10, Ho Chi Minh）
[8]早稲田大学大学院創造理工学研究科（〒169-8555 新宿区新宿区大久保3-4-1）

2013年台風Yolanda(Haiyan)はフィリピンに史上最悪の被害をもたらした．このような前例のない災害の物理的な特性を科学的に検証するため，台風強度の統計的分析および現地調査と数値解析により高潮の空間分布を推定した．この結果，北西太平洋で過去62年間に発生した1,960個の台風のうち，Yolandaは上陸時の風速が過去最大，平均的な台風の2倍の進行速度で上陸したなどの特異性を定量的に示した．人的な被害の大部分はLeyte湾で発生した高潮によるものであったが，現地調査においてはLeyte湾全域で2m以上，最奥部では4m以上の範囲が広がり，局所的には7m以上の浸水が発生した場所も確認された．経験的台風モデルに基づく高潮解析でも，このような湾内での高潮分布の特徴を再現できることを示した．

Key Words : *Typhoon Yoland (Haiyan), Philippines, Storm Surge, Field Survey, Numerical Simulation*

1.　はじめに

2013年11月4日，北緯6度付近のトラック諸島近海で発生した台風Haiyan（台風30号，フィリピン名Yolanda）は，勢力を強めながら西進し，フィリピン東方沖に達した11月7日には気圧895hPaと猛烈な勢力に発達した．その後台風は勢力を衰えることなく，翌11月8日の明け方にかけてSamar島から南に突き出た半島に位置するGuiuanをかすめ，現地時間午前8時頃にLeyte島に上陸した．さらに台風は西進し，Cebu島北部，Panay島などフィリピン中部を横断し，11月9日には南シナ海に抜け，その後は北西方向へと移動し，最終的にはベトナム北部，中国国境近くに上陸し，消滅した（**図-1**）．

この台風の発生に伴い，台風が直撃したフィリピンのLeyte島や隣接するSamar島では甚大な高潮が発生し，極めて大きな被害をもたらした．2014年3月現在で死者・行方不明者の合計は7,284人，高潮や台風による被害家屋は114万世帯に上っている[1)]．

本論文では，台風Haiyanについて，①経路や強度の統計的な分析，②現地調査，③解析による高潮の推算，の3段階の検証を行い，フィリピンに史上最悪の被害をもたらした台風および高潮の物理的特性の検証を試みる．なお，被害は社会学的な要因等によっても拡大したと考えられるが，それらの影響についてはEsteban ら[2)]や柴山ら[3)]を参照されたい．

2.　台風強度の統計的分析

台風Haiyanは発生直後から多くのメディアで史上最大規模の台風であると報道されていた．近年発生した台風の中で最大規模であったことは，被害の大きさを考えれば自明であるが，他の台風と比較して具体的にどの程度の規模であったかは，これまで必ずしも明確ではなかった．ここでは，台風の統計的分析を行い，台風Haiyanの特異性を定量的に検証する．

(1)　分析手法

米軍合同台風警報センター（JTWC）の過去62年間（1951－2012年）のベストトラックデータを用いて，

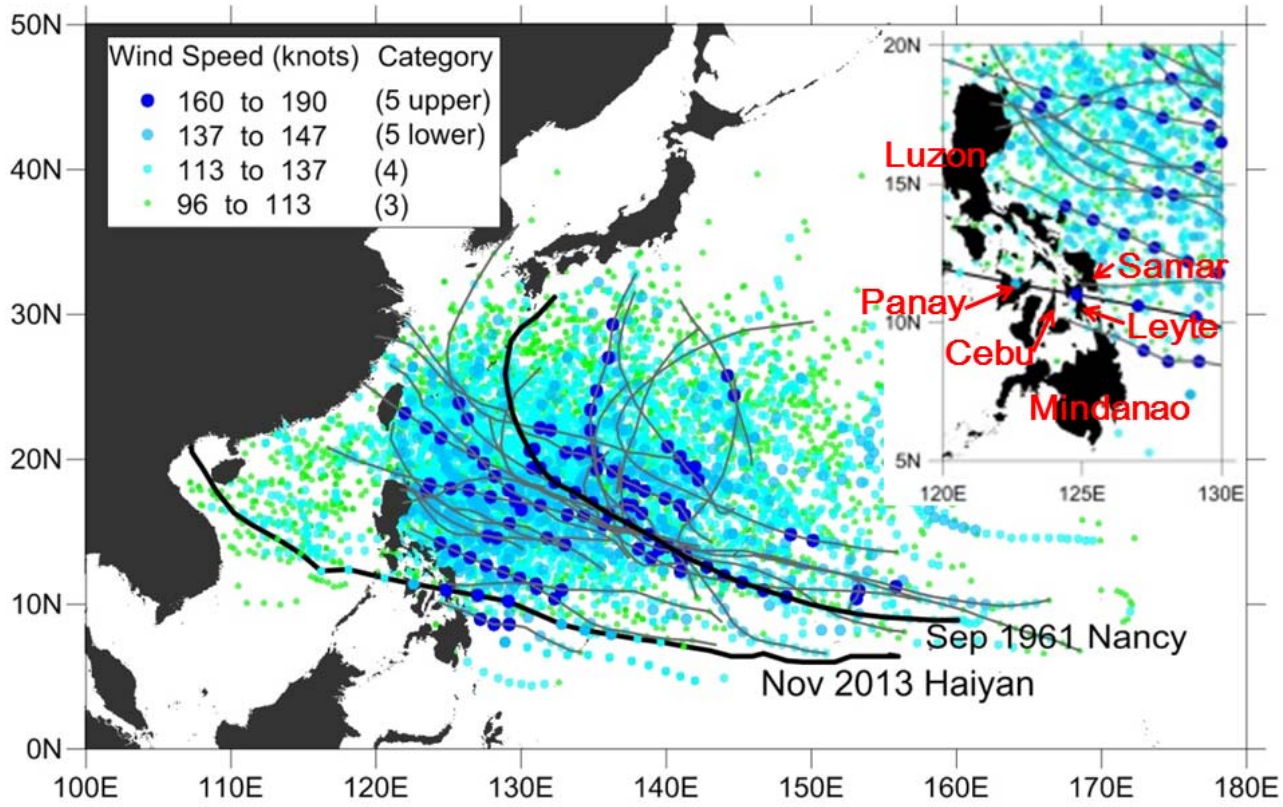

図-1 北西太平洋におけるカテゴリー3以上の台風発生状況（1951-2012年）と2013年台風Haiyanの経路.
過去最大の風速を記録した台風Nancy（第2室戸台風）の経路も併せて示す.

2013年の台風Haiyanが過去の台風と比較して，どのような統計的特徴を示すか分析する．なお，台風強度については，日本の気象庁は中心気圧を重視し，米国のJTWCは風速を重視しており，考え方の相違が見られる．気象庁では，台風の強度分類は中心気圧により階級分けをしており，風速は参考扱いであるが，JTWCの採用するSaffir–Simpsonハリケーンスケール(SSHS)は風速により階級分けをしている．本研究では，高潮の検証が目的であるため，高潮増幅により一層の影響を及ぼす風速に着目して台風強度を分析する．また，JTWCデータを使用するのは，気象庁データと比較して長い期間の風速データが利用できることもその理由の一つである．

高潮に注目した場合，台風強度の分析をする際に特に着目すべき点は，①上陸時の風速，②上陸時の進行速度であると考える．したがって，本研究ではこの2点に関して，台風Haiyanの統計的な特性を検証する．

(2) 分析結果

a) 全般

図-1は，過去62年間（1951－2012年）の台風経路の上にHaiyanの経路を重ねて作成し，風速と経路を同時に把握できるようにしている．但し，全ての台風（総数1,960）に対して経路を加えると，膨大な数になり図が塗りつぶされてしまう．そこで，SSHSの階級におけるカテゴリー3以上の台風（風速96ノット以上）のみを抽出し，かつ経路についてはカテゴリー5の台風のうち，160ノット（82m/s）以上を記録した極めて強度の強い28個の台風のみを示している．北西太平洋全体で見ると，いかにフィリピンにこのような激甚な台風が数多く来襲しているかが一見してわかる．また，フィリピン諸島が台風進路上で防波堤のような役割を果たし，それ以西のベトナムや中国で台風の数，強度ともに小さくなっていく様子がわかる．このように，特にフィリピンの東側は強度の強い台風が最も発生しやすい海域といえる．

しかし，フィリピンの島々の中では，今回台風Haiyanが上陸したLeyte島やその以南では台風の発生数が目立って少ない．これは低緯度のためコリオリ力が小さく，低気圧性の渦が発生しにくいためである．但し，160ノット以上の極めて強い台風が発生する頻度に限っていえば，他の島と比較して大差は見られない．すなわち，Leyte島の周囲では，台風自体は稀であるが，ひとたび発生すると強力な台風に発達しやすいということができる．これは元来赤道に近いほど海水温が高く，温かい湿った空気が供給されやすい環境にあるためと考えられる．

b) 上陸時の風速

台風Haiyanの上陸時の最大風速（1分間平均）は160ノ

ットであったが，**図-1**よりこの台風が過去において唯一160ノット以上の風速を伴って上陸していることがわかる．他の全ての台風は上陸前に急速に勢いを失い，上陸時にはカテゴリー3程度かそれ以下に減衰している．よって，上陸時の風速についていえば，台風Haiyanは北西太平洋の過去62年間において最大であったといってよい．

なお，海上通過時を含む風速の過去最大値は1961年の台風Nancy（第2室戸台風）のときの185ノット（95m/s）である（**図-1**）．但し，1940～60年代のJTWCの風速値は過大に記録されており，台風Nancyの185ノットは過大評価であるとの指摘もある[4]．

図-2は北西太平洋におけるカテゴリー1以上（64ノット以上）の台風の発生割合を示している．Haiyanの上陸時の風速160ノットは上位0.4%以内に位置付けられる．

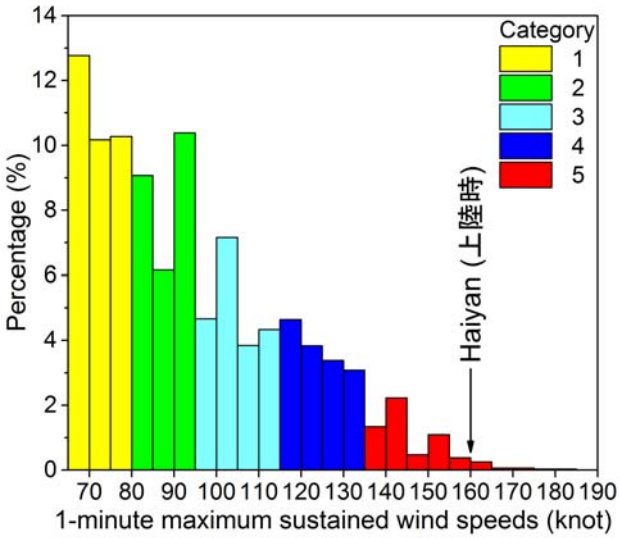

図-2　北西太平洋における台風の最大風速の出現分布

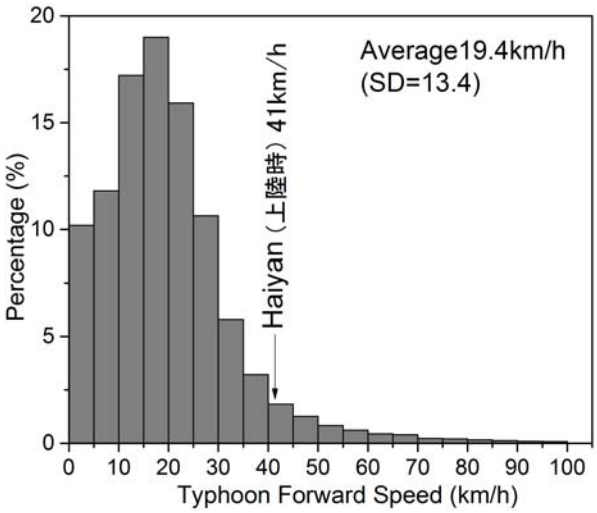

図-3　北西太平洋における台風の進行速度の出現分布

c) 上陸時の進行速度

高潮を引き起こす風速は，傾度風と台風の進行に伴い生じる場の風のベクトル和で表されるため，上陸時の進行速度は高潮規模の決定要因の一つである．

図-3は過去62年間の全ての台風の位置情報より進行速度を計算した結果を示している．台風Haiyanの上陸時の進行速度は41km/hであったが，これは全台風の平均値のおよそ2倍，上位6%の速度にあたり，非常に速い進行速度であったことがわかる．また，**図-3**には中緯度で偏西風に乗って高速で進む台風も含まれるため，それらの台風を除けば実質的にはHaiyanの進行速度は最大クラスであったといえる．

3.　高潮の調査

前章では，台風Haiyanの上陸時の最大風速，進行速度が，ともに過去最大クラスであったことを明らかにした．一方，この台風がフィリピンに過去最悪の被害をもたらしたことは既に述べた通りであり，過去最大の台風が引き起こした最悪な災害であったといってよい．但し，今回の災害の場合，特に人的な被害の大部分が高潮によるものであったため[3]，実際にどのような規模の高潮が現地で発生していたかを検証する必要がある．

(1)　高潮現地調査

筆者らは，高潮の規模や発生状況を検証するため，2013年12月4日から12月13日の期間，総勢16名からなる高潮合同調査団を組織して調査を行った．本稿では，特に被害の大きかったLeyte湾の高潮高さの計測結果のみを示す．各調査地点の詳細な状況については柴山ら[2]を参照されたい．

(2)　調査結果

図-4は，高潮高さの空間的な分布を示している．Leyte湾全域で2m以上の高潮が発生しており，さらに湾の最奥部のSan Pedro湾では4m以上の高潮が観測されている．局所的には，海面上7m以上の浸水が発生した場所も確認された．強風に伴う風波の成分も浸水高に含まれている可能性はあるが，現地での調査を総合すると，湾奥部では吹き寄せ，吸い上げの定常的な成分のみで最低でも5m以上の水位上昇が発生していたと推測される．

4.　高潮の数値解析

史上最大クラスの台風により，どの程度の規模の高潮が発生し，それがどのような振る舞いを示したかを明らかにすることは，フィリピンは無論のこと，日本の高潮防災を考える上でも重要である．また，現地調査より明

らかになった被害状況と照らし合わせ，そのような被害を及ぼした高潮の空間的・時間的な特性を把握する必要がある．そのためには，信頼性の高い数値解析による検証が不可欠であり，本章では筆者らによって実施された高潮解析結果を示す．なお，解析はフィリピン全域について実施したが，ここでは最も高潮が大きく表れたSan Pedro湾の結果のみを示す．

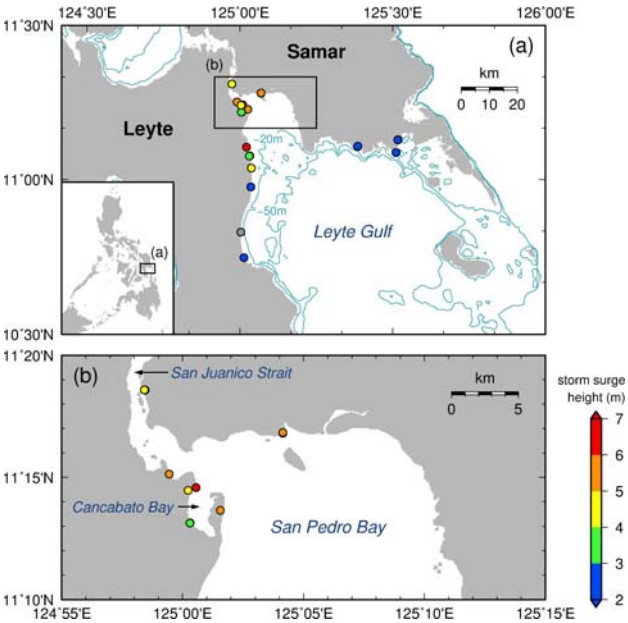

図-4　Leyte湾における高潮高さの分布

(1)　解析手法および設定条件

高潮の解析は，筆者らによって作成された経験的台風モデル[5]と流体モデルであるDelft3D Flowを組み合わせて実施し，吹き寄せと吸い上げの成分のみを計算する．

台風モデルはMyersの式による気圧分布とそこから求まる風速に対して超傾度風の補正[6]を施している．台風Haiyanの中心気圧や台風位置については気象庁のデータを使用した．

Delft3D Flowでの計算格子については，フィリピンを大きく含む広域の計算については3000m，Leyte湾内の狭域については100mの間隔を設定した．水深データは，広域はGEBCO_08 Gridを使用し，狭域については現地で入手した海図を数値化して使用した．いずれの領域も，緯度経度をUTMへ変換し，直角座標系での解析を行っている．なお，高潮の到達時の天文潮位が海図上の基準（MLLW）高さとほぼ一致していたため，潮位変化に伴う水深補正は行っていない．また，標高は分解能30mのASTER GDEMのデータを使用し，100m間隔のデータを作成した．マニングの粗度係数は，津波解析での設定条件[7]を参照し，海域は0.025，陸域は0.06を設定した．

(2)　最大風速半径

経験的台風モデルで設定する最大風速半径は，セブ島の気象レーダー[8]の降雨強度分布から半径15~25km程度であると推定される（**図-5**）．さらに半径を特定するため，台風モデルによる試計算を行い気圧の推算値と実測値が最も適合する半径を検証した．**図-6**は，最も甚大な被害が発生したTacloban市内で観測された気圧降下[9]と最大風速半径15，20，25kmの推算値を比較したものである．半径20kmの結果が最も実測に近く，気圧降下の状況を精度良く再現できていることがわかる．この結果をもとに，解析では最大風速半径として20kmを設定した．但し，時間のピークについては，推算値が30分程度遅延している．これは，気象庁の3時間ごとの台風位置を内挿して使用しているために生じる誤差と考えられる．

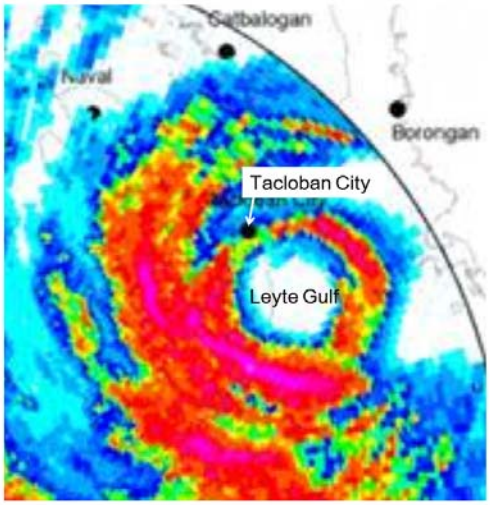

図-5　台風HaiyanのLeyte湾通過時の降雨強度分布

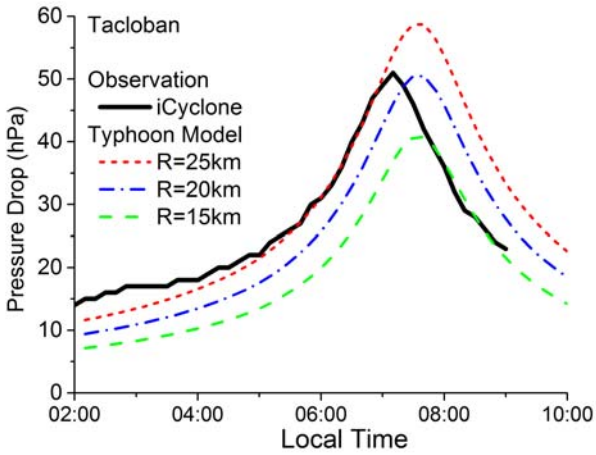

図-6　Tacloban の気圧降下の実測と推算の比較

(3)　解析結果

図-7に解析結果を示す．**図-7(a)**は台風通過前後の6時から9時半の時間帯に計算された高潮偏差の最大値を抽出し，その空間的な分布を表した図である．現地調査同

様，解析でもSan Pedro湾で4m以上の高潮が広く発生している状況が再現できている．また，湾の最奥部のTacloban周辺で5m以上の偏差が発生している場所もあり，この地区で特に大きな高潮被害が発生した状況と合致する．浸水の範囲については，Tacloban空港が浸水している状況が適切に再現されている他，海岸線沿いの浸水の様子も現地の状況と合致するところが多い．但し，実際には浸水が全域で発生したと考えられるTacloban中心部で解析上は浸水が限定的であるなど，再現性が低い場所もある．この理由は，解析上の誤差の他，標高データの精度の問題も大きい．筆者らが確認したところ，前述のTacloban中心部ではASTER GDEMの標高値が明らかに過大な地点が多数存在し，そのような地点では浸水が計算上起こり得ない条件になっている．浸水高や範囲を精度良く解析するためには，さらに信頼性の高い標高データによる解析が不可欠である．

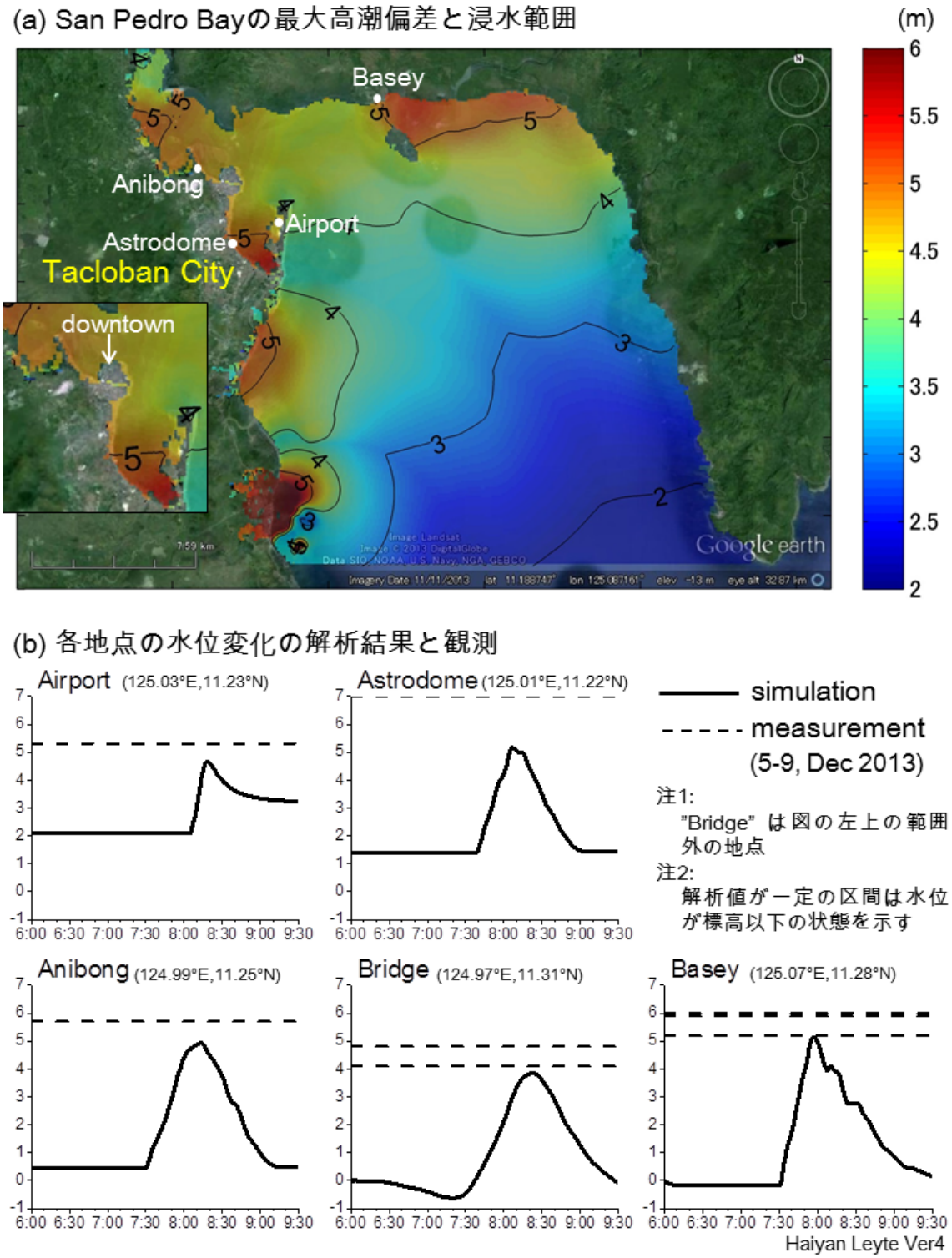

図-7 Leyte湾奥（San Pedro湾）の最大高潮偏差と代表地点の水位変化（b図の縦軸は水面からの浸水高(m), 横軸は2013年11月8日の現地時間．隣接して観測を行った場所では，複数の観測値を示している．）

図-7(b)はLeyte湾最奥部5地点における水位変化を示している．実線は解析，破線は現地調査により特定された近傍の1地点あるいは複数地点の浸水高の実測値（潮位補正後）を示している．計算の出力地点と現地調査の位置は必ずしも正確に一致しておらず，100m程度離れている地点もあるが，解析結果と実際の高潮規模を概ね比較することができる．全般的に解析は実測よりも小さめの値を与えており，その差は50cm程度の地点が多いが，2m近く過小評価している地点もある．但し，解析では波浪やそれによる水位のセットアップ，また建物周囲での反射やせき上げなど，実際には発生しているはずの吹き寄せと吸い上げ以外の水位上昇成分を考慮していないので，解析値が小さく表れること自体は自然な結果といえる．また，現地調査では聞き取りにより高潮水位を特定した箇所が多いので，実測値にも有意な誤差が含まれていることも否定できない．このように解析には幾つかの課題が残されているものの，実際に発生した被害の状況と比較しても，再現性は比較的高いと考えられる．

5. 結論

本論文では，フィリピンに甚大な被害をもたらした2013年台風Haiyanについて，①経路や強度の統計的な分析，②現地調査，③解析による高潮の推算，の3段階の検証を行った．北西太平洋で過去62年間に発生した台風のうち，台風Haiyanは上陸時の風速（160ノット）が過去最大，また上陸速度（時速41km）も平均的な台風の2倍の速度にあたることが明らかになった．したがって，フィリピン史上最悪の被害に繋がった第一の理由は，このような前例のない災害の物理的な猛威によるものと考えられる．現地調査の結果，高潮の高さはLeyte湾全域で2m以上，湾奥に行くにつれて高くなり，最奥部のサンペドロ湾では4m以上の範囲が広がり，局所的には7m以上の浸水が発生した場所も確認された．また，高潮解析の結果，概ねにおいてこのような湾内での高潮分布の特徴を適切に再現できることがわかった．

謝辞：本研究は，国際緊急共同研究・調査支援プログラム（J-RAPID）「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・社会科学融合研究」（代表者：高木泰士），私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「減災研究の国際展開のための災害研究基盤の形成」（代表者：柴山知也），および科学研究費補助金基盤（B）No. 22404011「アジア・アフリカ地域における沿岸災害脆弱性変容の調査」（代表者：柴山知也）のもとに行われた．現地調査では，熊谷健蔵氏，大山剛弘氏，島川英介氏，水谷宣道氏，Paolo Valenzuela氏，Jakee Lim Gremio氏らの協力を得た．記して謝意を表す．

参考文献

1) NDRRMC : Site Report No. 106 Effects of Typhoon “Yolanda (Haiyan)” 06 March 2014, 2014.
2) Esteban Miguel,松丸亮,高木泰士,三上貴仁,柴山知也,Mario De Leon,Ven Paolo Valenzuela,Nguyen Danh Thao：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.（印刷中）
3) 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：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.（印刷中）
4) Cyclone FAQ Subject E1, http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/E1.html, 2013.
5) 高木泰士, Nguyen D. T., Esteban M., Tran T. T., Knaepen H. L., 三上貴仁: ベトナム南部の沿岸域における災害脆弱性の検証, 土木学会論文集 B3（海洋開発）, Vol. 68, No. 4, pp.888-893, 2012.
6) 藤井健，光田寧：台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレイション，京都大学防災研究所報告，第 29 号 B-1, pp.229-239, 1986.
7) 国土交通省：津波浸水想定の設定の手引き，2012.
8) PAGASA： Cebu Doppler radar imagery, http://www.pagasa.dost.gov.ph/
9) iCyclone：iCyclone Chase Report by Josh Morgerman, http://www.icyclone.com/

ANALYSIS OF THE 2013 TYPHOON YOLANDA (HAIYAN) AND SUBSEQUENT STORM SURGE

Hiroshi TAKAGI, Takahito MIKAMI, Tomoya SHIBAYAMA, Ryo MATSUMARU, Mario de LEON, Miguel ESTEBAN, Thao Danh NGUYEN and Ryota NAKAMURA

Typhoon Yolanda made landfall in Leyte Island at near peak strength, with maximum sustained wind speeds of 160 knots, the largest in the recorded history of the Western North Pacific. Yolanda approached very quickly with a forward speed of 41km/hr towards Leyte, which was also the largest among typhoons with similar intensities. As a result of these extreme gusts and the exceptionally low central pressure of the typhoon, Yolanda caused the largest storm surge in the recorded history of Philippines. The spatial distribution of storm surges occurred in Leyte Gulf shows reasonable agreement between the field survey conducted by the authors and the storm surge simulation with an empirical typhoon model.