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	高潮浸入時の避難行動に関する現地調査と浸水・避難統合数値シミュレーションの構築
Title	Field survey on evacuation behavior at the peak time of storm surge and development of integrated inundation / evacuation simulation model
著者	黒部笙太, 高木泰士
Authors	Kurobe Shota, Takagi Hiroshi
出典	土木学会論文集B3（海洋開発）, Vol. 74, No. 2, p. I_779-I_784
Citation	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 74, No. 2, p. I_779-I_784
発行日 / Pub. date	2018, 9
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) 2018 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. 74, No. 2, I_779-I_784, 2018.

高潮浸入時の避難行動に関する現地調査と浸水・避難統合数値シミュレーションの構築

黒部　笙太[1]・高木　泰士[2]

[1] 東京工業大学大学院修士課程　環境・社会理工学院融合理工学系
（〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1）
E-mail:kurobe.s.aa@m.titech.ac.jp
[2] 正会員　東京工業大学大学院准教授　環境・社会理工学院融合理工学系
E-mail:takagi@ide.titech.ac.jp
（〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

2013 年 11 月にフィリピンを襲った台風 Haiyan は強風と高潮により，沿岸域に甚大な被害をもたらした．台風常襲国でありながら被害が拡大した一要因として，高潮の理解が不十分で，避難が遅れたことが指摘されている．筆者らが行った調査では，海水が住居に浸水した時点で屋外に逃げ出したため，流れに巻き込まれて犠牲になった住民が少なからずいたことが判明した．事前避難が避難計画の大原則であるが，このように避難を行わない・行えない住民がいる現実を考えると，高潮の住居浸入という極限の状況を想定して避難行動を検証する必要がある．本稿では，台風 Haiyan の際に住民がどのような避難行動をとったか，Tacloban 市で現地調査を行った．また，高潮浸水と避難行動を同時解析するモデルを構築し，高潮到達時に水平避難を行うことが合理的な選択行動といえるか検証した．

Key Words : *typhoon haiyan，storm surge model，evacuation model，multi-agent based model*

1.　はじめに

2013 年 11 月 4 日午前 9 時頃トラック諸島近海で発生し, 8 日午前にフィリピン中部を横断した台風 Haiyan（フィリピン名 Yolanda，以下 Haiyan に統一表記）は強風と高潮によりフィリピン各地に甚大な被害をもたらした．国家災害リスク軽減・管理評議会 (National Disaster Risk Reduction and Management Council, NDRRMC)によればフィリピン全土での死者・行方不明者は 7,362 人(2014 年 4 月 17 日時点)であり，家屋損害は約 114 万棟に上る．特に Leyte 島と Samar 島では，台風が強い勢力のまま上陸して 7m 近い高潮が発生し，死者・行方不明者の合計が 6,907 人(フィリピン全土の犠牲者の 9 割以上)であった[1]．

被害の原因は多岐に渡るが，高潮が前例のない規模であったことや台風移動速度が非常に速かったことの他に，警報で伝えられた *storm surge* という高潮を意味する英語を理解できずに，逃げ遅れた住民がいたことが指摘されている[2, 3, 4, 5]．このように事前に避難を行わない，あるいは行えない住民がいる状況を考えると，高潮の住居浸入という極限の状況を防災上看過できない．

本研究では，最初に事前に避難をしなかった住民が高潮浸水時にどのような行動をとったか調べるため，Leyte 島 Tacloban 市中心街において現地調査を実施した. 次に，Haiyan の高潮浸水解析と避難モデルを同時解析するモデルを作成した．最後に，そのモデルを利用して，高潮侵入時の避難行動について検討した．

2.　現地調査

筆者らが行った先行研究[5]では，Tacloban 市の現地調査より特定した 14 地点の高潮浸水深と数値解析の計算結果を比較し，モデルの妥当性を確認している．また，流速と浸水深をかけ合わせた水深流速積（depth-velocity products）が歩行者の溺水や建物の損傷に直接影響する指標と言われているが[6]，この指標を計算して Tacloban 市中心街では人が容易に流される場所が大部分であったことを示している．今回実施した調査では，実際に高潮に流された人がいたのか証言を得るため，2015 年 12 月 13 日から 4 日間 Tacloban 市にて現地調査を行った．調査では計 38 世帯を訪問し（**図-1**），浸水深，台風上陸時の居場所，避難有無，人が流されるのを目撃したか，流れの速さや方向など 12 の項目に関して聞き取り調査を行った．以下では，その一部の結果について述べる．

(1) 高潮の流速と流れの方向について

38 世帯中 12 世帯の住民は，Tacloban 市に高潮が到達した際に自宅以外の建物に避難をしていたため，高潮時の状況を目撃していなかった．また，4 世帯は仕事中であったことや，近くに窓がなかった，という理由から屋外の様子を見ていなかった．そのため，本研究では人や車・家具などの物が流されているのを目撃した計 22 世帯の情報を参照して，以下の検討を行った．図-2 は，台風時に Tacloban 市内で高潮の様子を撮影した動画[5), 7)]を被験者に見せて，自身が目撃した高潮をその流れの速さ（0.6m/s 程度）と見比べてもらった結果である．

図-1　聞き取り調査を行った場所と高潮被害の目撃情報
背景：Google Earth（画像取得日 2016 年 11 月 14 日）

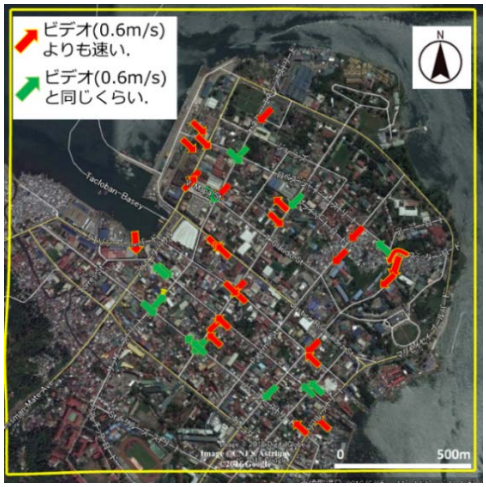

図-2　聞き取り調査より推定した高潮の流速と方向
背景：Google Earth（画像取得日 2016 年 11 月 14 日）

(2) 住民の避難行動について

38 世帯のうち，台風上陸前日に避難したのはわずか 4 世帯であった．前日に避難行動を取らなかった 34 世帯のうち 5 世帯は台風が上陸した 12 月 8 日午前 7 時以降に，自宅以外の場所へ避難した，と回答している．(図-3).

図-4 にあるように避難行動をとった 12 世帯のうち 7 世帯が「その場にいては危険だと直感した」という理由で自宅以外の建物に避難している．さらに，4 世帯が「家に水が浸入したから」という理由で避難を開始している．

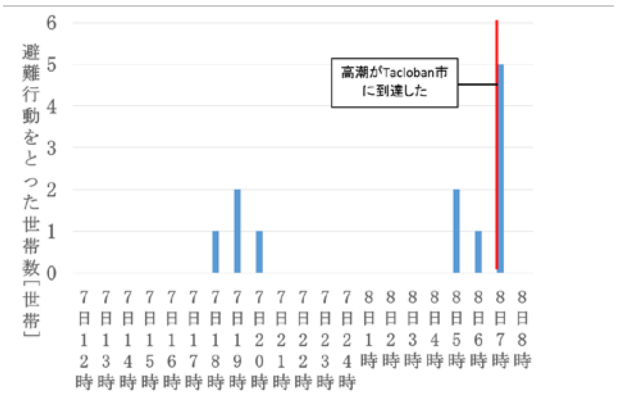

図-3　避難行動を開始した時刻とその世帯数

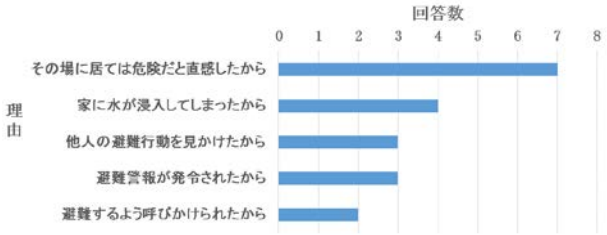

図-4　避難行動を行った理由（複数回答可，世帯数 12 世帯）

以下に，個人より聞き取った高潮前後の様子を示す．

A さん(40 代/男性/行商人)の記憶

自宅にテレビやラジオを所持しておらず，台風の情報を事前に得るすべがなかった．水位が膝の高さまで上がってきたため，身の危険を感じ，100m 程度離れた近隣の地区長の住宅（三階建）まで冠水する路地を歩き避難した．避難先のテレビで初めて台風に関する情報を知った．

B さん(20 代/男性/レストランスタッフ)の記憶

高潮発生時は海辺に面した一階建ての食堂で勤務していた．突然高い波が押し寄せてきて流された．B さんと同じくスタッフである老人と共に，すぐ向かいのビルの二階まで泳ぎ着き，バルコニーの柵にしがみついたまま水位が下がるのを 30 分程待っていた(図-5 左).

C さん(50 代/女性/商店経営者)の記憶

家族は前日に避難をしたが，店を見守るために C さんのみが家に残った．しかし，強風で屋根が吹き飛ばされ，その後，一階建ての住居の屋根直下まで高潮が上がってきたため，屋根を支えている柱を抱えるようにしがみつき流されるのを堪えた．最も水位が高かったときには，鼻の下まで水に浸かった(図-5 右).

台風が上陸する以前に避難行動を行っておらず，高潮が住居に浸入したことで身の危険を察し，冠水した道路を歩き避難行動を行った住民が一定数いたことが住民調査より分かった．このように命からがら助かった人がいた一方で，水に流されている人を目撃した住民もいた．

本調査の結果より，事前避難を前提にした避難計画のみでなく，高潮の住居浸入という極限の状況を想定して最適な避難行動を検討する必要があると考える．このときは，ハザードマップのように最大浸水深のみに着目するのではなく，高潮による水位上昇や流速，流れの方向で決まる物理的時間変化に対して，人が避難を行うのに十分な時間が残されているか，刻一刻と減っていく残余時間を考慮する必要性がある．

図-5　高潮生存者からの聞き取り調査の様子

3.　高潮氾濫解析モデル

(1)　高潮氾濫解析モデルおよび解析条件

本研究では，経験的台風モデルによる風場・気圧場の計算と流体解析モデル Delft3D-FLOW による高潮の計算を組み合わせたモデル[5), 8), 9), 10)]を使用した．高潮解析は，図−6 に示すように三段階の領域に分けて計算を行い，Tacloban 市中心街を再現した第三領域の浸水計算の結果を次節で説明する避難モデルに入力した．

陸地の粗度係数については，第一・二領域では津波解析で一般的に使用される数値を参照して 0.06 を設定した．一方で，第三領域の陸域では，高潮上陸時のビデオ[7)]を参照して流速を推定し，ある一点における流速が最も合致する値として 0.04 を採用している．解析条件の詳細については筆者らの先行研究を参照されたい[5), 10)]．

表-1　計算条件

項目	概要	
計算領域	第一領域(3000m格子)	
	第二領域(100m格子)	
	第三領域(10m格子)	
高潮の成因	台風Haiyan(中心気圧895hpa)	
時間ステップ	Δt=0.005 min	
潮位条件	平均低低潮(MLLW)	
再現時間	2013/11/8 6:00～2013/11/8 9:40	
水深データ	第一領域	GEBCO_08 Grid
	第二領域	NAMRIAにより作成された海図
	第三領域	NAMRIAにより作成された海図
陸域地盤高	第一領域	ASTER GDEMのデータ
	第二領域	ASTER GDEMのデータ
	第三領域	2014年現地調査にて測定したデータ
粗度係数	第一領域	海域：0.025　陸域：0.06
	第二領域	海域：0.025　陸域：0.06
	第三領域	海域：0.025　陸域：0.04

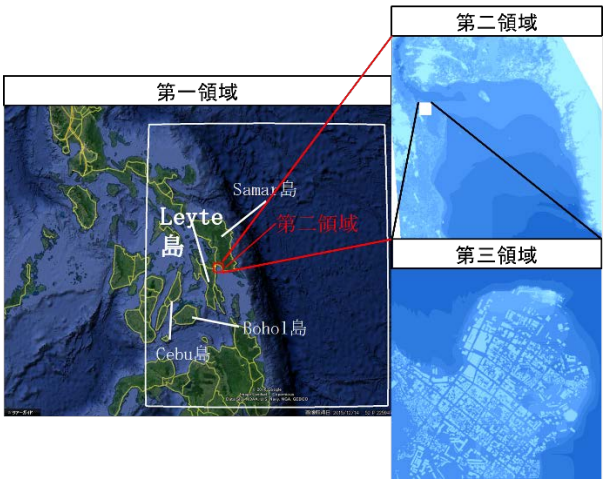

図-6　計算領域（第三領域が本研究の対象領域）

(2)　高潮解析の再現性

高潮解析結果と 2014 年に行った聞き取り調査[5)]で確認した市内 15 地点における最大浸水深を比較したところ，図−7 に示すように比較的高い再現性を確認できた．

加えて今回実施した住民証言から得た 20 地点における高潮の流れる方向と流速の程度を高潮解析の結果と比較したところ，22 地点中 17 地点において現地調査の結果と解析結果が一致することを確認した(図−8).

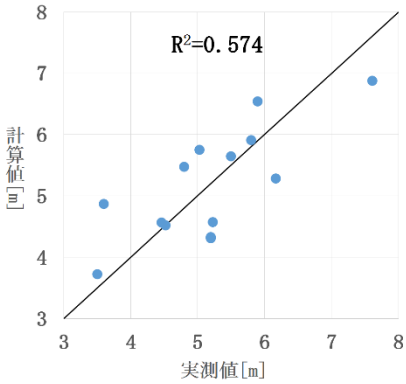

図-7　15 地点における高潮の最大浸水深の解析結果と実測値の比較

図-8　解析結果と聞き取り調査の流速の概略比較
（矢印は調査で明らかになった流向）

4. 避難数値シミュレーション

(1) 避難行動シナリオ

住民が高潮発生時にどのような避難行動をとるか，そのシナリオの作成に当たっては，井上ら[11),12)]による避難行動仮説を参照した.

a) 避難グループ・タイミング

現地調査の結果から，避難を行う際は単独行動ではなく，大部分が家族や近所の人々と共に移動していることが分かった．後述する避難数値シミュレーションの計算格子が 5m であることから，25m^2 に含まれている住民集団を住民ユニットと定義した．本研究では．一住民ユニットを 20 人程度の家族や近所の住民で構成され, 子供から老人までが均等に含まれるグループと仮定した.

避難のタイミングは，聞き取り調査で得た状況を参考にして，避難警報などのタイミングは考慮せず， 各住民ユニット内で浸水が発生したと同時に避難を開始するものとした.

b) 避難者の移動速度

今回計算領域とした Tacloban 中心街では高低差が 1m 以下の場所が大部分で[5)], 最大勾配も 1%程度であるため, 高低差に伴う速度変化は考慮しなかった．また，現地調査では避難した人全員，徒歩で移動したと答えたため, 乗り物移動を考えず徒歩移動のみを考慮した.

西原[13)]による実験から，道路の混雑状況(群集密度)と住民の存在する地点の浸水深さ h [m]に応じて以下の式のように歩行速度 v [m/sec]を設定した.

$$v = \begin{cases} v_a * (1 - h/h_{fau}) & (h \leqq h_{fau}) \\ 0 & (h > h_{fau}) \end{cases} \tag{1a}$$

$$v_a = \begin{cases} 1.67 - 0.42\rho & (\rho \leqq 3) \\ 0.42 & (\rho > 3) \end{cases} \tag{1b}$$

ここで，ρ は 1 計算格子内に存在する住民ユニット数である．h_{fau} は避難行動が不可能になる水深であり，ここでは 1m としている.

c) 避難先施設・避難経路

NDRRMC の避難計画では, Tacloban 市中心街には大人数を収容できる公的避難施設は計画されていない．広域避難場所は 2km 南下したところにある Tacloban City Convention Center であるが，台風上陸時の強風と豪雨を考えると，住民が 2km も徒歩で避難することは考えにくい．実際に現地調査でも，広域避難場所に避難した住民は皆無で, 自宅の周辺で最も強固に見える建物に避難をした, という回答が目立った．また, NDRRMC 避難計画でも近くに広域避難場所が存在しない場合は，最寄りのショッピングモールや学校，病院や市役所などの強固な建物に避難するよう，書かれている.

そこで今回の避難行動シナリオでは，計算区域内に存在するショッピングモール，学校，病院，ホテルを避難施設と仮定し，**図-9** に示す計算対象内に 32 箇所設定をした．住民ユニットは高潮浸水時に自身から見て最も近い避難施設に最短経路を通って避難すると仮定した.

d) 避難成功条件

Cox ら[6)]によると, 歩行者は浸水が 1m 以上あるいは水深流速積が 0.6m^3/s 以上の場合に，流水に流される．高潮氾濫解析の結果に基づき，各住民ユニットの位置が安全か逐一比較し，流れに巻き込まれず避難施設に到達できた場合，その住民ユニットは避難に成功したと考える．なお，以下のシミュレーションでは，流れの方向に応じて避難方向を変更するような制御も可能であるが，台風荒天時に流れの正確な把握は難しいと考えられるため, 移動先の方向転換は考えないことにした.

(2) 避難シミュレーション

避難シミュレーションにはエージェント型プログラミング言語 Netlogo を採用した．高潮氾濫解析の計算結果から各地点における水深と流速の時間変化を入力した．解析時間は台風上陸前後の 2 時間 40 分を設定し（**表-1**），避難計算ステップを 0.2 分とした.

NetLogo は自然現象や社会現象をシミュレーションするためのプログラム可能なモデリング環境であり，時間発展する複雑なシステムをモデリングすることに適している．独立して動作する数百数千のエージェントに事象に応じた指示を与えることができ，ミクロレベルの個体の行動と，それらの相互作用によって創発されるマクロレベルのパターンとの間の相互関係を導くことができる.

地形モデルに関しては，先述したよう地盤高変化に伴う速度変化は考慮せず，街区の形状配置のみ考慮した．街区内の土地利用は, OpenStreetMap (OSM) を使用して，家屋，避難先施設，道路・路地，の 3 つの土地利用と海岸線を 5m 精度で細かく再現した．住民ユニットの初期配置についてはフィリピン統計局によって 2010 年に行われた人口調査[14)]を基に 2690 の住民ユニットを仮定し，家屋の存在する場所にその面積に応じて配置した．現実には，住民全員が避難する訳ではないが，本検証では大局をつかむため，このような仮説をおいた.

図-9 に住民ユニットの初期配置と浸水を考慮せず，全ユニットが最寄りの避難施設に避難を行なった際の施設ごとのユニット数，すなわち避難者数のポテンシャルを示す. 計算領域東部のポテンシャルが高いことが分かる.

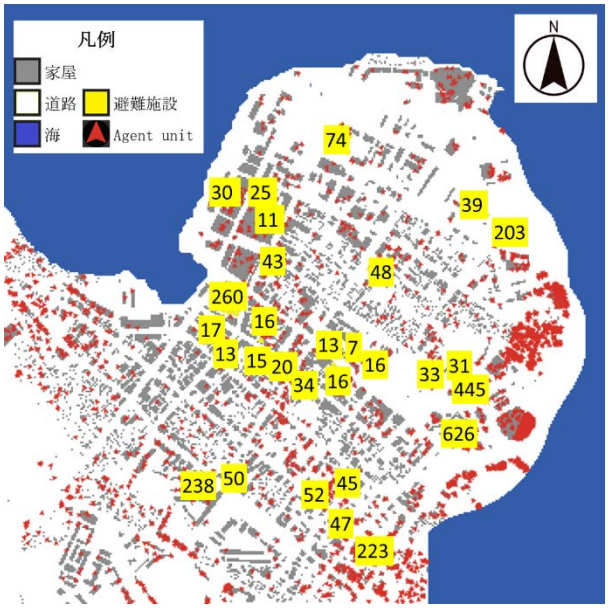

図-9　住民ユニットの初期配置と避難先.
数字は各施設に逃げ込む避難ユニットの総数（2690）

(3)　シミュレーション結果

図–10 に成功可否の時間推移を示す．浸水が生じない場所もあるため，避難成功と避難失敗（合計）の最終和は 2690 ユニット未満になっている. 避難失敗はさらに深水深による溺水と水深流速積による溺水に分かれる．浸水と同時に避難を開始した場合，午前 7:50 頃まで緩やかに避難に成功したユニットが増え続けるが，その後避難に失敗したユニット数が急激に増えていることがわかる. 避難に成功するユニット数と避難に失敗するユニット数の増え方はほぼ等しく, 最終的には 1325 ユニットが避難に成功し，1256 ユニットが避難に失敗している.

あくまで(1)に示したシナリオを仮定した一結果に過ぎないが，住居へ高潮が浸入してから避難行動を開始した場合でも, 避難が成功する割合は半数を超えているが, 失敗の割合も 46%とそれに近いことがわかった．以前より津波や河川洪水に対する水平避難の危険性について，一般的に指摘されてきたが，高潮についてもそのことがいえる.

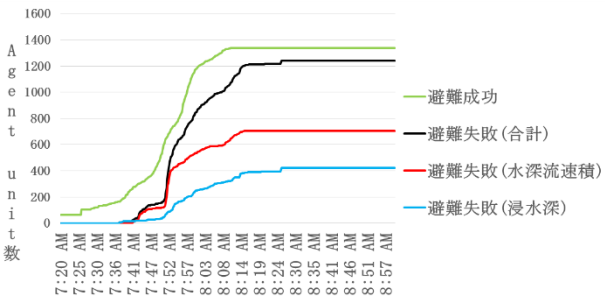

図-10　避難成否の時間推移とその内訳

(4) 最大浸水深と避難成否

図–11 に高潮氾濫解析より求めた最大浸水深を国交省[15]が示す危険度毎にエリア分けした結果, 図–12 に住民ユニットが流されて避難に失敗した地点を示す.

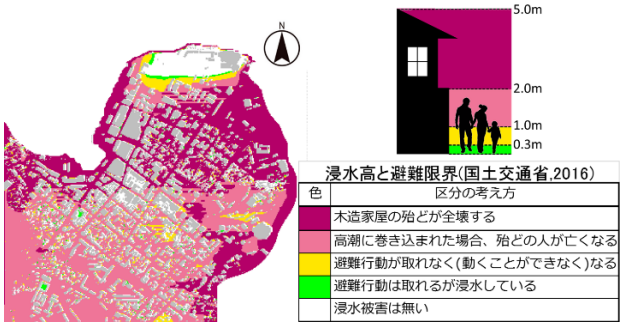

図-11　最大浸水深を危険度毎に色分けした図

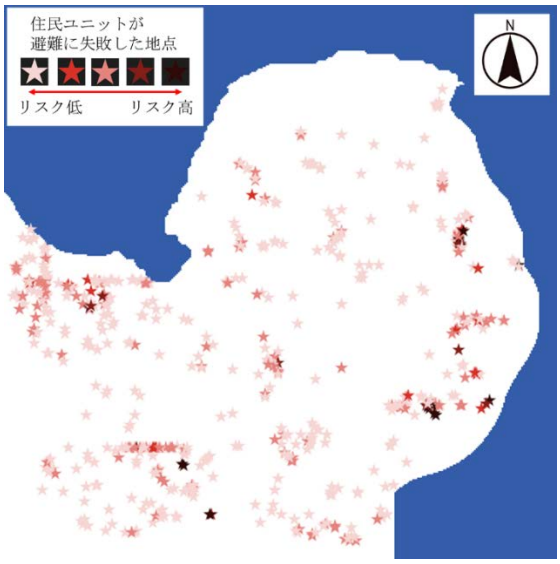

図-12　住民ユニットが避難に失敗した場所

図–11 では，海岸線沿いや北東部の高潮リスクが特に高い．しかし，図–12 の避難シミュレーションの結果では，南西部においても避難失敗ユニットが多いことが分かる．これは内陸部に避難施設が少ないため，最寄りの避難施設までの移動距離が長くなり，高潮に巻き込まれる可能性が高まるためである．全般的に西部に比べると東部で避難失敗が多いのは，高潮水位がより高く，流速も早いため，避難を許される時間が短いためと考えられる．また，東部は住宅分布に比べて避難施設の場所が比較的狭いエリアに固まっていることも影響している.

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，現地調査によって得た住民証言を参考にして，高潮および避難の統合数値モデルの作成を行った．このモデルを用いることで，高潮の進

行方向や流速，避難速度，人口分布，避難施設場所，道路配置など，浸水深の評価のみでは考慮できない様々な要素を評価でき，避難成否を時間推移で表すことができる．シナリオを仮定して解析を行い，避難に失敗するリスクの高い場所や区域毎に必要な避難施設の収容人数など，行政の防災担当者が包括的な避難計画を策定する際に役立てられると期待する．

謝辞：本研究はJSPS科研費(26702009, 16KK0121)の支援を受け行われた．また，現地調査はMario Leon氏，Silla Jerome氏に協力して頂いた．ここに謝意を表する．

参考文献

1) NDRRMC，National Disaster Risk Reduction and Management Council: NDRRMC UPDATE Updates FINAL REPORT re EFFECTS of Typhoon "TOLANDA"(HAIYAN), pp.1-6，2014.
2) Mikami T.，Shibayama T.，Takagi H.，Matsumaru R.，Esteban M.，Thao N. D.，de Leon M.，Valenzuela V. P.，Oyama T.，Nakamura R.，Kumagai K.，Li S. : Storm surge heights and damage caused by the 2013 Typhoon Haiyan along the Leyte Gulf Coast，Coastal Engineering Journal，p.27，2016.
3) Esteban M.，Valenzuela V. P.，Matsumaru R.，Mikami T.，Shibayama T.，Takagi H.，Thao N. D.，de Leon M. : Storm surge awareness in the Philippines prior to Typhoon Haiyan: A comparative analysis with tsunami awareness in recent times，Coastal Engineering Journal，p.28，2016.
4) Takagi H.，Esteban M. : Statistics of tropical cyclone landfalls in the Philippines -unusual characteristics of 2013 Typhoon Haiyan, Natural Hazards，80(1)，pp.211–222，2016.
5) Takagi H，Li S，de Leon M.，Esteban M.，Mikami T.，Matsumaru R.，Shibayama T.，Nakamura R. : Storm surge and evacuation in urban areas during the peak of a storm, Coastal Engineering，Vol. 108，pp.1-9，2016.
6) Cox R.J.，Shand T.D.，Blacka M. J.: Australian Rainfall&Runoff Revision Projects Project10 Appropriate Safety Criteria for People STAGE1 REPORT，p.19，2010.
7) iCyclone: Super Typhoon Haiyan (Yolanda) http://www.icyclone.com/chases/haiyan-2013.html
8) 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:「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，pp.I_1206-I_1211，2014.
9) 高木泰士，Nguyen Danh Thao，Miguel Esteban，Tran Thu Tam，Hanne Louise Knaepen，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，No2，pp.I_891-I_892，2012.
10) Takagi H, Esteban M, Shibayama T, Mikami T, Matsumaru R，Leon M. D，Thao N. D，Oyama T. & Nakamura R. : Track analysis，simulation，and field survey of the 2013 Typhoon Haiyan storm surge，J. Flood Risk Management，DOI: 10. 1111/jfr3. 12136，p.15，2017.
11) 井上和也，戸田圭一，川池健司: 高潮ハザードマップと避難に関する二・三の検討:海岸工学論文集 第 44 巻, pp.356-358，1997.
12) 井上和也，戸田圭一，栗原哲，武田誠，谷野知伸: 洪水ハザードマップの作成についての一考察:京都大学防災研究所年報 第 39 号 B-2，pp.459-464，1996.
13) 西原巧: 氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究: 京都大学学位論文，1983.
14) Philippine statistics authority: 2010 Census of Population and Housing Total Population by Province， City， Municipality and Barangay: as of May 1，pp.67-70，2010.
15) 国土交通省水管理・国土保全局: 河川環境課水防企画室: 水害ハザードマップの手引き，pp.37-39，2016

(2018.2.8 受付)

FIELD SURVEY ON EVACUATION BEHAVIOR AT THE PEAK TIME OF STORM SURGE AND DEVELOPMENT OF INTEGRATED INUNDATION / EVACUATION SIMULATION MODEL

Shota KUROBE and Hiroshi TAKAGI

Typhoon Haiyan struck the Philippines in November 2013, causing a severe damage in coastal areas as a result of strong winds and storm surges. Despite the Philippines being a country with a relatively ample experience of typhoon-disaster management, some previous studies have pointed out that evacuations procedures have been delayed due to insufficient perception of storm surges as a life-threatening phenomenon. A survey conducted by the authors in Dec 2015 demonstrated that some residents only started to evacuate after they noticed floodwater that intruded into their houses. The fact of delayed evacuations of some inhabitants, which unavoidably happen in any circumstances, urges the need to further consider optimal evacuation procedure and behaviors under extreme storm surges conditions in order to save more lives. This paper reports findings obtained from the field survey conducted in Tacloban City in pursuance of revealing the evacuation behaviors of residents during Typhoon Haiyan. In addition, this paper includes the presentation of a constructed evacuation simulation model, which aims at investigating optimum evacuation behaviors under storm flooding. The simulation model further questioned the rationale of horizontal evacuation in already flooded condition compared to vertical evacuation inside buildings.