

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

高潮の現地調査と
気象・高潮数値モデルによる分析・将来予測
Analysis and Future Prediction of Typhoons
and Storm Surges by Field Surveys and
Numerical Atmosphere - Ocean Model

申 請 者

| | |
|-------|----------|
| 中村 | 亮太 |
| Ryota | NAKAMURA |

建設工学専攻 海岸工学研究

2016 年 10 月

本稿の前半部では、実施した現地調査や数値解析にもとづいて分析した高潮被害の様相と、世界の国々の高潮対策に関わる沿岸域災害対策指針をまとめた。ここでは、熱帯低気圧と高潮の算定手法、気候変動後における特性の変化の既往研究に注目した。後半部では、気象・海洋数値モデルによるアンサンブル高潮予測の手法の提案・評価と、気候変動を考慮した場合の大気・海洋物理場の台風・高潮強度の評価、および、将来の防潮堤の計画高さ決定に資する評価を行った。

2013年の台風ハイランによるフィリピン・レイテ島、サマル島沿岸域の高潮災害と、2014年北海道根室市市街地・港湾部における高潮災害の被害の諸相を分析した。2013年のフィリピンの高潮では、災害を特徴づける複数の気象的・地形的・社会的災害素因を特定した。実施した現地調査では、バッセイ近郊において、高潮の前面構造が段波形状になっていたこと、現地住民の高潮に関する知識が乏しかったことを高潮被害の要因として指摘した。2014年の根室市の高潮災害では、現地調査の結果、汀線付近から市街地にむけて地盤高さが減少していた。そして、低気圧と高潮を数値解析した結果、根室市市街地と根室港が、風速の急激な変化によって発生する高潮災害を受けやすい場所だったことを指摘した。

沿岸域の防災対策指針は国ごとに異なる。発展途上国とヨーロッパ諸国、アメリカ合衆国などは、高潮災害に対するソフト防災対策を重点的に進めている。一方で、我が国やヨーロッパ諸国では、高潮災害に対するハード防災対策を進めている。我が国が高潮災害へのソフト防災対策に数値予報を用いておらず、関連学術論文の少なさからも高潮災害に対するソフト沿岸防災対策に関する関心が薄いことがわかる。2005年と2012年のハリケーンがもたらした高潮災害をきっかけとして、アメリカ合衆国ではソフト防災対策に追加して、ハード防災対策も検討・実施している。高潮災害が発生した地域では、多重層安全（Multi Layer Safety）の防災概念を導入している。

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）を契機として、気候変動後の熱帯低気圧の特性の変化に関する研究は数多く行われてきたが、いまだに学術的合意には至っていない。Emanuel（2005）は、海水面温度、気温、湿度が熱帯低気圧の特性に影響すると包括的に指摘している。さらに、海水面温度の上昇は熱帯低気圧を発達させるということも指摘している（Emanuel, 1987; Knutson et al., 2010）。近年では、気温と熱帯低気圧の関係に注目した研究（Emanuel et al., 2013; Vecchi et al., 2013; Wang et al., 2014）も行われているが、その機構が明確に言及されておらず、学術的合意には到達していない。そして、湿度と熱帯性低気圧の関係性はほとんど言及されていない。

気候変動後の熱帯低気圧や寒冷低気圧に引き起こされる高潮の変化が近年、多く指摘されている。冬季低気圧の変化に注目した気候変動を想定した将来における高潮の変化がLowe et al. (2001)によって指摘された。さらに、Karim・Mimura（2008）は海水面温度と高潮の関係にも言及している。このように、気候変動の

海水面温度, 海面上昇と高潮洪水の関係性がいくつかの研究で言及されている.

本研究では, 沿岸域のソフト防災対策に資するために, 2013 年の台風ハイヤンを対象として, 気象・海洋数値モデル (ARW-WRF, FVCOM) を用いてアンサンブル高潮予報を実施した. アンサンブル高潮予報には, 2013 年 11 月 4 日 12:00 の Global Forecast System の予報データを用いた. 高潮災害は 2013 年 11 月 8 日 00:00 に発生したため, 3.5 日前に得られるデータのみを使って予報したこととなる. 9 個のアンサンブルメンバーは, 台風の強度・進路算定を支配する雲微物理 3 スキームと惑星境界層 3 スキームから構成した.

まず, 台風の数値計算の結果を評価した. アンサンブルメンバーの最低海面更正中心気圧は, 約 930~895 hPa となっており, 全体的に気象庁推定値よりも過大評価していた. この過大評価の傾向は, 他の論文においても指摘されることが多い (Lin et al., 2011; Mori et al., 2014). また, 台風ハイヤンで観測された急速発達過程の再現も難しい課題である. しかしながら, メンバー 8 においては, レイテ湾接近時に海面更正中心気圧が 895 hPa 程度まで低下しており, 既往の研究 (Mori et al., 2014; Islam et al., 2015) と比較しても, 数値計算の推定精度が高かった. メンバー 8 の気象場がよく現実の大気の状態を再現していた理由としては, 雲微物理スキームの選択がよかったことと, LES をもとにした RANS 型の乱流モデルを含む惑星境界層スキームを用いた結果であることが考えられる.

個々のアンサンブルメンバーの高潮高は, 2.58~6.44 m となった. アンサンブル高潮予報では, 個々の高潮高さの平均値を算出して, 高潮予報とすることが一般的である (Flowerdew et al., 2010). しかしながら, 最大高潮高の平均値は, 3.05 m となっており, 観測値の 6.20 m よりも低くなった. これは, 巨大な高潮では, その最大値が比較的短い時間に現れるためである. 位相の操作後には最大高潮高は 4.62 m となったが, やはり過小評価している. これは, 台風規模を全体的に過小評価していたためであると考えられる. 一方で, メンバー 8 を用いた結果では, 最大高潮高は 6.44 m となっており, 計測値と概ね一致していた. また, 位相操作を行う際の最大高潮高の発生時間は, 2013 年 11 月 8 日 02:00 となった. 現地調査の結果では, 2013 年 11 月 8 日 00:00 である. アンサンブル高潮予報は最大高潮高の発生時間を予報できる可能性を持つと考えられる.

台風・高潮の強度を支配する大気・海洋環境物理場を特定するために, 擬似温暖化実験を行った. ここで用いた環境場は, IPCC 第五次作業部会の RCP 8.5 シナリオに沿った全球大気循環モデルの 26 個のアンサンブルの平均値を用いた. 詳細には, 日本近海域では 2006-2015 年と 2041-2060 年 ('50 年ケース), 2081-2100 年 ('90 年ケース) の海水面温度, 気温, 湿度の差異を大気・海洋物理場に挿入して擬似的に温暖化場を構築した. この差異はそれぞれ, 海水面温度が 3.16 K, 成層圏における気温は最大 6.4 K の減少, 対流圏における気温は最大 6.0 K の上昇, 湿度は最大 5 % 程度上昇していた. そして, 台風 Man-yi (2013),

Roke (2011), Fitow (2007) を擬似温暖化実験の対象とした。

台風 Roke の場合での最低海面更正中心気圧は、海水面温度を上昇させたケースでは 933 hPa ('50 年ケース), 909 hPa ('90 年ケース) となった。再解析結果を用いた数値計算結果である 955 hPa と比較すると、海面更正中心気圧が低下している。これは、Emanuel (1987) や Knutson et al. (2010) などの研究結果と一致する。次に、海水面温度と気温の変化を考慮すると、最低海面更正中心気圧は、948 hPa ('50 年ケース) と 933 hPa ('90 年ケース) となっており、海水面温度を変化させたケースと比較して海面更正中心気圧が上昇している。更に、気温を変化させたケースの最低海面更正中心気圧は、967 hPa ('50 年ケース) と 973 hPa ('90 年ケース) となっており、現在気候の数値計算結果と比較して、台風の中心気圧の上昇(台風強度の低下)がみられる。他の台風の Man-yi や Fitow の数値算定結果のケースにおいても、同様の傾向がみられた。これらの結果より明らかに、気温の上昇は台風の強度を低下させる働きがあった。①大気海洋物理場が変化する。②台風強度に影響を与える因子である僭越フラックスの値が変化する。③台風の強度が変化する。といった順序で、大気物理環境場が台風強度に変化を与えると考えられる。湿度を変化させたケースでは、海面更正中心気圧は現在気候の場合と差異は少なく、湿度の熱帯低気圧に対する影響は少ない。高潮の高さは、台風の強度に比例して強くなっていたため、台風強度と高潮強度の傾向は同一である。ただし、気候変動後に台風・高潮強度が増加する原因の一つとして、気温が与える海面からの潜熱上昇量の低下による台風の強度低下を、海水面温度の増加による潜熱フラックスの上昇量の増加による台風の強度上昇が下回るという可能性がある。

以上を踏まえて、防潮堤の計画高さの評価法、および、気候変動を考慮した将来の高潮計画高の簡便な決定法を提案した。東京検潮所付近では、高潮偏差の計画高さが 3m と設定されている。そのため、風速と高潮偏差の関係の近似式によると、48.9 m/s 以上の風速(角度成分: 160°)が発生した場合に、防潮堤の高さを上回る高潮が発生する可能性がある。ここで、Tsuboki et al. (2015) は 21 世紀最後(2074-2087 年)の日本近海の台風強度は、その最大風速が 74 m/s から 88 m/s と 18 %程度増加するとしている。さらに、平均風速は 53 m/s から 61 m/s の 15 %程度増加するとしている。そのため、気候変動後の風速の増加を考慮すると、同程度の高潮偏差から守ろうとする場合、56.2 ~ 57.7 m/s の風速(角度成分: 160°)による高潮から沿岸域を守る必要がある。その風速に対する高潮計画高さは、近似直線より 3.89 m と 4.08 m となった。さらに、Kopp et al. (2016) がまとめた、21 世紀最後の全球規模における RCP8.5 シナリオの海面上昇を考慮すると、現在の 3m の計画高さから 4.32 - 5.28 m に変更すると、現在と同程度の防災機能を維持できる。同様に横浜と船橋では、現在の 3.3m から 5.15 - 6.03 m (横浜)、現在の 1.8 m から 2.87 - 3.65 m へ変更する必要がある。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 中村 亮太 印

(2017年 2月 現在)

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------|--|
| a.論文 | 国際学術誌 (International academic paper with peer reviews) |
| 1 | Nistor, I., Goseberg, N., Stolle, J., Mikami, T., Shibayama, T., <u>Nakamura, R.</u> and Matsuba, S.: Experimental Investigation of Debris Dynamics over a Horizontal Plane, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. (doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000371). |
| ○2 | <u>Nakamura, R.</u> , Shibayama, T., Esteban, M. and Iwamoto, T.: Future Typhoon and Storm Surges under Different Global Warming Scenarios: Case Study of Typhoon Haiyan (2013), Natural Hazards 82(3), pp.1645-1681, 2016. |
| 3 | Takagi, H., Li, S., de Leon, M., Esteban, M., Mikami, T., Matsumaru, R., Shibayama, T. and <u>Nakamura, R.</u> : Storm Surge and Evacuation in Urban Areas during the Peak of a Storm, Coastal Engineering 108, pp.1-9, 2016. |
| 4 | Mikami, T., Shibayama, T., Takagi, H., Matsumaru, R., Esteban, M., Thao, N. D., de Leon, M., Valenzuela, V. P., Oyama, T., <u>Nakamura, R.</u> , Kumagai, K. and Li, S.: Storm Surge Heights and Damage Caused by the 2013 Typhoon Haiyan along the Leyte Gulf Coast, Coastal Engineering Journal 58, 1640005, 2016. |
| 5 | Takagi, H., Esteban, M., Shibayama, T., Mikami, T., Matsumaru, R., Leon, M. D., Thao, N. D., Oyama, T. and <u>Nakamura, R.</u> : Track analysis, simulation, and field survey of the 2013 Typhoon Haiyan storm surge, Journal of Flood Risk Management, 2015. (doi: 10.1111/jfr3.12136) |
| 6 | Esteban, M., Valenzuela, V. P. Yun, N. Y., Mikami, T., Shibayama, T., Matsumaru, R., Takagi, H., Thao, N. D., De Leon, M., Oyama, T. and <u>Nakamura, R.</u> : Typhoon Haiyan 2013 Evacuation Preparations and Awareness, International Journal of Sustainable Future for Human Security 3(1), pp.37-45, 2015. |
| 7 | Tasnim, K. M., Shibayama, T., Esteban, M., Takagi, H., Ohira, K. and <u>Nakamura, R.</u> : Field observation and numerical simulation of past and future storm surges in the Bay of Bengal: case study of cyclone Nargis, Natural Hazards., 75(2), pp.1619-1647, 2014. |
| | 国内学術誌 [査読有] |
| ○8 | <u>中村亮太</u> , 柴山知也: 台風・高潮強度を支配する大気・海洋物理環境場の特定とその影響評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_1495-I_1500, 2016. |
| 9 | 大矢淳, 柴山知也, <u>中村亮太</u> , 岩本匠夢: 東京湾における沿岸域災害対策の費用便益分析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.72, No.2, pp.I_880-I_885, 2016. |
| ○10 | <u>中村亮太</u> , 岩本拓夢, 柴山知也, 三上貴仁, 松葉俊哉, Martin MAELL, 舘小路晃史, 田野倉祐介: 2014年12月に北海道で発生した温帯低気圧による根室の高潮被害の現地調査と発生機構の解明, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 71, No. 2, pp.I_31-I_36, 2015. |

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|-------|---|
| ○11 | 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 : Typhoon Yolanda によるフィリピンの高潮被災と現地調査の比較, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_236-I_240, 2014. |
| 12 | 岩本匠夢, 中村亮太, 大山剛弘, 水上亮, 柴山知也 : 気象-高潮-潮汐 結合モデルを用いた東京湾における RCP8.5 シナリオ化での高潮予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.I_1261-I_1265, 2014. |
| 13 | 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. |
| 14 | 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, pp.I_1212-I_1217, 2014. |
| b.総説 | なし. |
| c.講演 | 国際会議 [概要書の査読有] (international conference with peer reviews in abstract) |
| 1 | Mäll, M., Kul, A., Nakamura, R., Shibayama, T. and Suursaar, U.: Modelling storm surge conditions under future climate scenarios: A Case Study of 2005 january storm Gudrun in Pärnu, Estonia”, the 35th International Conference on Coastal Engineering, Istanbul, Turkey, November, 2016. (Presented by Mäll, M.) |
| ○2 | Nakamura, R. and Shibayama, T.: Ensemble forecast and assessment of extreme storm surge: a case study of 2013 typhoon Haiyan, the 35th International Conference on Coastal Engineering, Istanbul, Turkey, November 2016. (Presented by Nakamura, R.) |
| 3 | Soltanpour, M., Shamsunia, H., Shibayama, T., Nakamura, R. and Tatekouji, A.: An experimental study of wave-induced particle velocities in fluid mud layer” the 35th International Conference on Coastal Engineering, Istanbul, Turkey, November 2016. (Presented by Soltanpour, M.) |
| 4 | Tatekouji, A., Nakamura, R. and Shibayama, T.: Influence of Historical Bathymetric Changes due to Urbanization on the Vulnerability of Storm Surge in Tokyo Bay,” the 35th International Conference on Coastal Engineering, Istanbul, Turkey, November 2016. (Presented by Tatekouji, A.) |
| ○5 | Nakamura, R. and Shibayama, T.: A numerical experiment of super-typhoon and extreme storm surge under RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios,” Proceedings of the 9th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC), Rio de Janeiro, Brazil, October, 2016. [http://www.gapcongressos.com.br/trabalhos/z0167/20151130270_full.pdf] |

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む） |
|--------|--|
| 6 | Shamsnia, S. Soltanpour, M., Shibayama, T., <u>Nakamura, R.</u> and Tatekoji, A.: A Laboratory Study on Mud Transport Induced by Solitary Wave, Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16), University of Ottawa, May, 2016. [http://rdio.rdc.uottawa.ca/publications/coastlab16/coastlab15.pdf] |
| ○7 | <u>Nakamura, R.</u> , Oyama, T., Shibayama, T., Esteban, M. and Takagi, H.: Evaluation of Storm Surge Caused by Typhoon Yolanda (2013) and Using Weather - Storm Surge - Wave - Tide Model”, the 8th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), IIT Madras, Chennai, India, September, 2015. (Procedia Engineering, 116, 373-380) |
| 8 | Tasnim, K. M., Ohira, K., Shibayama, T., Esteban, M. and <u>Nakamura, R.</u> : Numerical Simulation of Cyclonic Storm Surges over the Bay of Bengal Using a Meteorology-Wave-Surge-Tide Coupled Model, Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Seoul, Korea, June, 2014. (doi: http://dx.doi.org/10.9753/icce.v34.currents.26) 国内会議 [査読無] |
| 9 | 西崎晋作, 柴山知也, <u>中村亮太</u> : 気象・波浪結合モデルを使用した 2013 年台風 26 号における波浪の再現と地球温暖化後の波浪の評価, 平成 28 年度日本沿岸域学会, 高知工科大学, 2016 年 7 月. (講演者: 西崎晋作) |
| 10 | 館小路晃史, 柴山知也, <u>中村亮太</u> : 気象-海洋-潮汐統合モデルを用いた大正 6 年東京湾高潮の再現, 平成 27 年度日本沿岸域学会, 茨城大学, 2015 年 7 月. (講演者: 館小路晃史) |
| 11 | <u>中村亮太</u> , 柴山知也, 大平幸一郎, 大山剛弘: 気象-高潮-波浪-潮汐統合モデルを用いた地球温暖化後の東京湾と駿河湾の高潮の評価, 平成 25 年度日本沿岸域学会, 大阪市立大学, 2013 年 7 月. (講演者: 中村亮太) 招待講演 [査読無] |
| 12 | <u>Nakamura, R.</u> : 3-4 Days Forecasts Storm Surge Invoked by Typhoon Yolanda (2013) using with Satellite Observation Data in Typhoon Simulation, International Symposium on One Year After Yolanda: Findings and Discussions for the Future, De La Salle University, Manila, Philippines, October 2014. |
| d. 著書 | |
| 1 | Takagi, H., de Leon, M., Esteban, M., Mikami, T. and <u>Nakamura, R.</u> : Storm Surge Due to 2013 Typhoon Yolanda (Haiyan) in Leyte Gulf, the Philippines. Chapter 8, Handbook of Coastal Disaster Mitigation for Engineers and Planners. ELSEVIER, 2015. |
| e. その他 | なし. |