

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

論文題目

沿岸域の強風による水塊輸送と越波機構の解明

Mechanism of Wave Overtopping and Mass Transport under the
Influence of Strong Winds

申請者

稲垣 直人
Naoto INAGAKI

建設工学専攻 海岸工学研究

2022年12月

気候変動により、台風パラメータは変化しており、台風がもたらす沿岸災害の特徴も変化しつつある。2019年台風15号は、東京湾を縦断し、西岸の横浜市福浦海岸に大規模な越波・浸水被害をもたらした。この台風は中心気圧が低く、風域が狭いため非常に強い風を伴っており、湾内の特定の箇所に非常に高い波浪が来襲した。一方で、気候変動の傾向が継続すると、このように強度が高く、風の強い台風による被害が増える可能性があるという指摘が少なくない。これを踏まえると、沿岸での波浪場に強い風が作用したときに生じる現象のメカニズムを解明することは、将来の沿岸防災においてますます重要になると考えられる。

本研究では、将来起こり得る新たな沿岸災害の例として、2019年台風15号が福浦海岸にもたらした越波被害を取り上げた。現地調査および数値モデルによる波浪の再現計算の結果から、越波現象を捉える新しい視点を提案した。そして、その視点から議論される越波機構について、数値解析と水理実験の両面から検討を行うことを本研究の目的とした。

本論文は全六章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、研究の背景や目的、期待されるインパクトを述べ、海岸工学・防災工学における本研究の立場を具体的に示した。

第2章では、福浦海岸の被災状況から本研究の主題となる現象として、沿岸域の強風が越波規模を強めた可能性を指摘した。そして、強風作用下の越波現象を捉えるにあたり、本研究での新たな視点として、沿岸域の高波や越波を水塊の質量輸送として捉えることを示した。まず、現地調査、観測データ、および気象一波浪モデルによる波浪追算の結果から、福浦海岸の被災機構の解明を試みた。現地調査では、海岸護岸の破壊や護岸背後の丘の斜面の洗掘跡など大量の水塊が大きな運動量をもって福浦海岸に来襲したことが明らかになった。さらに、丘頂部の塩枯れについて、ある程度の大きさの水塊が風によって飛来したと判断した。一方で、数値モデルによる波浪追算の結果は、被害状況を説明するには過小なものとなった。今次台風の特徴である強い風や被害の特徴を考慮すると、強烈な岸向きの風が越波規模を強めた可能性がある。このように瞬間的な時間スケールで生じる高波現象について、採用した数値モデルの依拠するエネルギー輸送・位相平均の視点から離れ、水塊の質量輸送という運動学・位相解像の視点からの議論が有効であると考えられる。

第3章では、越波に関する研究について、風が越波にもたらす影響という視点から、議論の変遷を整理し、本研究で明らかにすべき点をまとめた。そして、以降の章で展開される具体的なアプローチについて述べ、既往研究に連なる本研究の立ち位置を明らかにした。越波における風の影響の可能性は古くから指摘されていたものの、設計においては規則波の知見を不規則波に拡張することが主流であり、越波研究の中心的な話題にはならなかった。1990年代には風洞水槽を用いて砕波、斜面遡上、飛沫といった様々な側面からの実験的研究がなされたが、現

象の統一的な理解や知見の整理は為されなかった。2000年代には越波防止の護岸設計に関する大規模国際プロジェクトが欧州を中心に推進され、風の影響は半経験的に導かれた補正項として設計式に組み込まれた。しかしながら、提案された設計式は設計外力の見積もりには簡便に利用できるものの、本質的な物理現象を反映しているとは言い難い。2010年代には数値計算手法によるアプローチが見られたが、現象の再現性や計算の安定性の両面からの議論が不足している。以上を踏まえると、水理実験と数値計算の知見が互いに補完し合わずにいる点に問題がある。このため、本研究のように「越波現象を水塊の質量輸送と捉える」という一つの視点で数値計算と水理実験の両面から議論を進める必要がある。数値計算は相似則を克服する可能性がある点で高い応用性と適用性が期待できるため、水理実験に先んじて検討を行った。

第4章では、数値計算手法を用いて、現象の再現性の限界や計算安定性についての考察を中心に、水塊の質量輸送の視点から越波を捉えることの妥当性の検証を行った。数値モデルには、離散化・計算手法として有限体積法（FVM法）、界面捕捉手法としてVOF法を採用した。提案した数値モデルを用いて、既往実験を再現すると、風による越波流量の増加という基本的な傾向は再現できているものの、砕波といった複雑な流体现象の再現性は十分ではなく、高風速での過小評価の傾向が確認された。さらに、これらの傾向を踏まえ、提案した数値モデルを不規則波に拡張し、現実スケールの福浦海岸に適用した。高風速で過小評価する数値モデルの傾向を考慮すると、計算結果は現地調査から見積もった値と比較して概ね妥当な値を示した。提案した数値モデルは質量・運動量保存に厳密であり、この点から、本研究における越波の視点は数値解析にある程度妥当であることが示された。一方、現象の再現においては、風速シェアなどの相界面での物理現象のモデルの導入が重要であることが分かったが、FVM-VOF法においては原理的に困難である。また、再現性の検討にあたって、越波水塊に加えて、砕波など越波以前に生じる現象を流速分布の構造から議論することが重要であることが分かった。以上の検討を踏まえ、数値計算で再現できない現象を補う系統的な水理実験の必要性が浮き彫りになった。

第5章では、風洞水槽を用いた水理実験による検討を行った。第4章での考察を踏まえ、PIV解析による流速分布の構造に注目し、越波水塊の風速による運動の変化について定量的に考察した。さらに、砕波や部分重複波の形成などの越波以前の現象を越波の素過程と見なし、それぞれの風の影響を議論するために系統的な実験デザインを志向した。無風時（風速 0 m/s）、中風速（6.84 m/s）、高風速（10.04 m/s）において、越波流量を入射波の波形勾配で整理すると、風速によって越波流量が著しく増加する傾向が確認され、特定の波形勾配について極値が観察された。この極値は海岸構造物の設計に通常用いられる許容越波流量を大きく超えており、風的作用によって越波規模が非常に大きくなる条件の存在が示さ

れた．具体的な風の作用は越波水塊に作用する直接的な影響と，越波以前の砕波や部分重複波の形成に作用する間接的な影響に大別されると考えられる．直立壁を遡上する水塊には風による持ち上げと岸方向への輸送が同時に作用し，このように越波水塊に直接作用する風の影響は直立壁周りの断面を通過する質量流量を計算することにより明らかになった．この点から，水塊の質量輸送が風作用下の越波現象の本質であるという本研究の視点の妥当性は，実験的に示された．一方で，間接的な風の影響を評価するために，砕波と部分重複波について，同様の PIV 解析を用いて風速による運動の変化を流速分布の視点から考察した．越波流量が最大となるような波形勾配を持つ波は，部分重複波の腹で大量の水塊を前方に打ち上げ，その一部が風で輸送されて直接越波することが確認された．さらに，風によって砕波位置や砕波形態も変化し，高風速条件でより多くのエネルギーを消費するように変化することが分かった．これにより，ある波形勾配では高風速条件での越波流量が，中風速の場合よりも却って小さくなるという場合があることが説明できる．以上のように，風は越波水塊や伝播する波に対して複雑な変化をもたらすため，時間平均的な物理量である越波流量に注目した議論では，複雑な物理現象を捉えられない可能性がある．本研究のように，対象の海岸構造物の特徴断面を通過する質量流量に注目する方が，物理的背景の理解および防災における知見の拡充に資すると考えられる．

第 6 章は結論であり，本研究で得られた主要な成果を総括した．強風作用下の越波機構は，水塊の質量輸送が本質であると考えられ，その視点の妥当性は数値計算および水理実験の両面から示された．

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 稲垣 直人 印

(2023年 1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	
1	Takabatake, T., Mäll, M., Chenxi, D., Inagaki, N., Kishizaki, D., Esteban, M., Shibayama, T. (2020): Physical modeling of tsunamis generated by subaerial, partially submerged, and submarine landslides, Coastal Engineering Journal, 62(4), 582-601.
○2	Inagaki, N., Shibayama, T., Esteban, M., Takabatake, T. Effect of translate speed of typhoon on wind waves. Nat Hazards 105, 841–858 (2021).
3	Esteban, M., Takabatake, T., Achiari, H., Mikami, T., Nakamura, R., Gelfi, M., Panalaran, S., Nishida, Y., Inagaki, N., Chadwick, C., Oizumi, K., Shibayama, T. (2021): Field Survey of Flank Collapse and Run-up Heights due to 2018 Anak Krakatau Tsunami, Journal of Coastal and Hydraulic Structures, 1, 1.
4	Takabatake, T., Han, D. C., Valdez, J. J., Inagaki, N., Mäll, M., Esteban, M., Shibayama, T. (2022): Three-dimensional physical modeling of tsunamis generated by partially submerged landslides. Journal of Geophysical Research: Oceans, 127, e2021JC017826.
○5	Inagaki, N., Shibayama, T., Takabatake, T., Esteban, M., Mäll, M., Thit O. K. (2022): Increase in overtopping rate caused by local gust-winds during the passage of a typhoon, Coastal Engineering Journal, 64:1, 116-134.
b. 総説	なし
c. 講演	
○1	稲垣直人, 柴山知也, 高島知行, Miguel Esteban (2020): 台風の移動速度の変化が高波の波高に与える影響, 第28回海洋工学シンポジウム, 遠隔システムによる開催, 2020年9月29日-30日.
○2	Inagaki, N., Shibayama, T., Esteban, M., Takabatake, T. (2020): EFFECT OF TRANSLATE SPEED OF TYPHOONS ON WIND WAVES, presented at the 37th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), virtual conference (vICCE 2020), October 6-9, 2020.
3	Esteban, M., Achiari, H., Takabatake, T., Nakamura, R., Mikami, T., Panalaran, S., Gelfi, M., Inagaki, N., Nishida, Y., Chadwick, C., Oizumi, K., Shibayama, T. (2020): FIELD SURVEY OF 2018 KRAKATAU TSUNAMI, presented at the 37th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), virtual
○4	稲垣直人, 柴山知也, M. Esteban, 高島知行 (2021): 台風の移動速度の変化が高波の波高に与える影響, 第68回海岸工学講演会 (オンライン開催), 2021年11月10日-12日.
5	高島知行, D. H. Chenxi, V. J. J. Panlilio, 稲垣直人, 澤辺大輔, Zhang Tingyu, 木場隆文, Zhao Bingchan, Mäll Martin, Miguel Esteban, 柴山知也 (2021): 地すべり津波を対象とした平面水槽による水理模型実験, 第68回海岸工学講演会 (オンライン開催), 2021年11月10日-12日

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 稲垣 直人 印

(2023年 1月 現在)

種別	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	Inagaki, N., Shibayama, T., Nakamura, R., Ishibashi, K., Esteban, M. (2022): EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS INTO THE EFFECT OF STRONG WINDS ON WAVE OVERTOPPING AT A VERTICAL SEAWALL, presented at 38th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Sydney, December 4-9.
d. 著書 ○1	Inagaki, N., Shibayama, T.: "4.2 Typhoon Faxai, 2019" and "9.1.8 History of tsunami and storm surge in Japan" in Coastal Disaster Surveys and Assessment for Risk Mitigation, Edited by Shibayama, T., Esteban, M. CRC Press, Taylor & Francis.