

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01438

研究課題名（和文）大規模越波にともなう海水飛沫の発生過程の解明と発生量の推定

研究課題名（英文）Quantitative estimation of sea water spray generated by a large-scale wave-overtopping at a vertical seawall

研究代表者

山城 賢（YAMASHIRO, Masaru）

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：70336014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：海からの飛来塩分による塩風害は、気候変動にともない今後増大すると考えられる。防波堤や護岸等の海岸構造物は、高波を防ぐ一方で飛来塩分の原因となる大量の越波飛沫の発生源となる。本研究では、海岸構造物における越波飛沫の発生過程を解明し、発生量の推定を可能とすることを目的とし、現地観測、水理模型実験および数値シミュレーションを実施した。それらの結果から、越波と風の状況による護岸背後の越波流量空間分布の変化、越波飛沫の粒径分布、飛来塩分濃度と越波飛沫粒径の関連などを検討し、越波により発生し護岸背後に拡散する越波飛沫量をおおむね推定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

越波飛沫の発生と飛散については、定性的には説明できても詳細な過程は解明されていない。本研究により越波飛沫の発生過程が解明されれば、海岸工学における学術的意義は大きい。さらに、発生量の評価が可能となれば、海岸構造物の計画・設計において、これまで考慮されていなかった背後域への越波飛沫の影響を定量的に評価できるようになり、今後の海岸整備の高度化に繋がることはもちろん、効果的かつ合理的な対策法の開発が期待される。本研究の成果は、今後の沿岸域のより良い環境整備をはじめ、社会基盤の維持管理や農業生産の安定等に貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Salt damage caused by sea salt particles from the sea is expected to increase in the future due to climate change. While coastal structures such as breakwaters and seawalls protect against high waves, they are also a source of large amounts of wave-overtopping spray, which is a cause of sea salt particles. In this study, field observations, hydraulic model experiments, and numerical simulations were conducted to elucidate the generation process of wave-overtopping splash on coastal structures and to estimate the amount of splash generated. From the results, changes in the spatial distribution of wave overtopping rate behind the seawall due to wave-overtopping and wind conditions, particle size distribution of overtopping splashes, and others were investigated, and it was shown that the amount of overtopping splash generated by wave-overtopping and diffused by wind behind the seawall can be estimated to some extent.

研究分野：海岸工学

キーワード：水工水理学 海岸工学 越波 越波飛沫 飛来塩分 現地観測 水理模型実験

### 1. 研究開始当初の背景

防波堤や護岸などの海岸構造物は波浪制御等の役割を果たす一方で、台風来襲時のニュース映像で目にするように大量の海水飛沫の発生源となる。波が護岸や海岸堤防を越えて陸域に流入する現象は「越波」と呼ばれる災害であり、これまで護岸等の海岸防護構造物は、越波流量(単位時間当たりの越波量)を許容値以下に抑えるよう整備されてきた。しかし、防波堤や護岸などの計画・設計において、越波にともない発生する海水飛沫(越波飛沫と呼ぶ)の周辺環境への影響は考慮されていない。その理由は、越波飛沫が人命の損失や構造物の破壊などの重大な被害に直接的には関わらないという事実に加えて、水理模型実験や数値シミュレーションで越波飛沫を検討することが難しいという技術的な問題もある。しかし、海水量としては少なくとも越波飛沫は周辺地域での塩風害を拡大させる。

2018年台風21号および24号による農作物の枯死や広域に及ぶ停電などの大規模な塩風害は記憶に新しい。塩風害は毎年頻発しており、農作物だけで数100億円の被害に達することもある。また、塩風害には短期の気象イベントによる被害だけでなく、飛来塩分が長期に亘り蓄積することで生じる鉄筋コンクリート構造物等の腐食・劣化という重大な問題もある。陸域の数10kmにも亘って拡散する飛来塩分の実体は、海から発生する数10 $\mu$ m以下の微小な海水滴(海塩粒子)であり、海岸構造物での越波飛沫のうち、微小な飛沫は飛散する過程で水分が蒸発して海塩粒子となる。四方を海に囲まれ防波堤や護岸などの海岸構造物がどうしても必要な我が国では、大規模越波にともなう越波飛沫から生じる海塩粒子が飛来塩分の大きな要因となっている。消波ブロック等により大規模越波をある程度抑えることはできるが、施設の目的や地形条件、コスト面から設置できない場合が非常に多い。越波飛沫の発生と飛散については、定性的には説明できても詳細な過程は解明されていない。海岸構造物による越波飛沫の発生量の推定は、塩風害を被る構造、建築、電力、農業などの多くの分野に影響する海岸工学分野における重要な課題である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、海岸構造物での大規模越波にともなう越波飛沫の発生過程を解明し、発生量の推定を可能とすることである。

### 3. 研究の方法

研究目的達成のため、以下の項目を実施した。

#### (1) 現地観測

現地観測の目的は、現地で実際に越波飛沫を計測し、越波や風の状況と越波飛沫との関連を把握することである。令和3年度冬季および4年度冬季に、山口県の日本海沿岸にある人工島の直立護岸で生じる越波を対象として、冬季風浪時に観測を実施し、越波量、飛沫量、飛沫粒径、飛来塩分量、風向風速を計測した。飛沫量の計測には転倒柵式雨量計を使用し、飛来塩分量は、円筒形の金網籠に乾燥ガーゼを巻いた飛来塩分捕捉器を作成して観測した。また、越波と飛沫の飛散の状況をビデオカメラで撮影した。加えて、気象庁等の関係機関で観測されている近隣の波浪観測データ、潮位観測データ、気象観測データを収集した。飛沫粒径の計測では、海水に反応する感水紙を用いた観測装置を作成し、飛来してくる微小な越波飛沫を捉え、粒径と個数の時間変化を把握することを試みた。

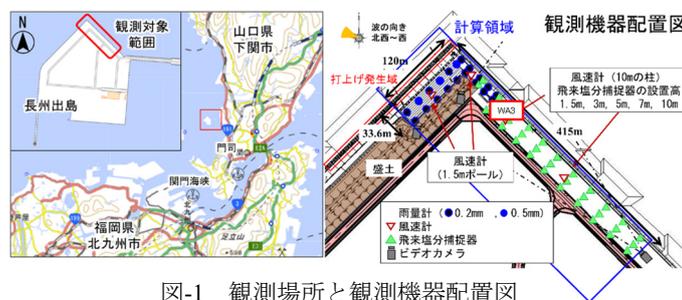


図-1 観測場所と観測機器配置図

#### (2) 水理模型実験

水理模型実験の目的は、現地では直接計測できない、越波飛沫の発生の状況や飛散過程、風の作用の詳細を把握することである。観測を実施した人工島における護岸や海底地形の条件をもとに、大きさが異なる2つの断面2次元造波風洞水路(九州大学、熊本高等専門学校)に異なる縮尺で実験模型を製作し、水理模型実験を実施して、まず、現地での越波流量空間分布を再現した。次いで、入射波、潮位、風速を変化させて越波流量空間分布を調べた。また、模型縮尺比によるスケール効果について検討した。さらに、高速度カメラを用いた可視化実験を行い、高く打ち上がった越波から強風により大量の飛沫が発生する過程について検討した。

#### (3) 数値シミュレーション

数値シミュレーションの目的は、現地での実際の現象と水理模型実験との差異を補完する情

報を得ることである。OpenFOAM を用いた越波による飛来塩分の 3 次元拡散シミュレーションを実施した。境界条件の設定や海塩粒子の沈降速度の計算などを検討し計算精度の向上を図り、飛沫粒径については現地観測結果をもとに設定した。また、水滴が風によりさらに細かく分裂する微小な飛沫の発生過程を再現するシミュレーションを試みた。加えて、現地観測時の来襲波浪の再現シミュレーションを行い観測時の波浪情報を推定した。

(4) 越波飛沫発生過程の解明と発生量の推定

現地観測、水理模型実験、数値シミュレーションの結果を総合的に検討し、越波の状況と風速から越波飛沫量を推定する手法について検討した。

4. 研究成果

(1) 現地観測結果

本研究では、護岸を越流する水量を計測するため、シンク（内容量 15.4L）と管路で用いる流量計（アズビル金門製；EKDA25mm）およびパルスロガー（電池式）を使用した簡易的な越波流量計測装置を独自に開発した（図-2）。これにより、越波流量の時間変化を計測することができ、潮位や来襲波浪の変化との関連を明確に把握することができた。

高く打ち上がる越波については、越波のビデオ映像から画像解析により打上げ高を自動で計測する手法を開発した。本手法では、二値化処理時に白い領域を収縮したのち膨張させるオープニング処理を施すことで、計測精度を高めることに成功し、ビデオ映像から目視での計測と同程度の精度で自動的に打上げ高を計測することが可能となった（図-3）。

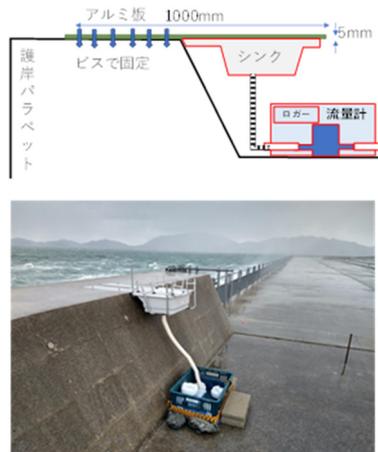


図-2 越波流量計測装置

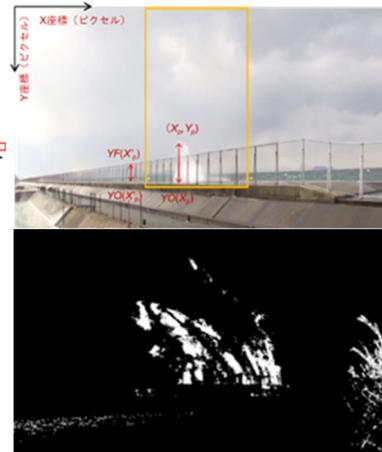


図-3 解析範囲と二値化画像

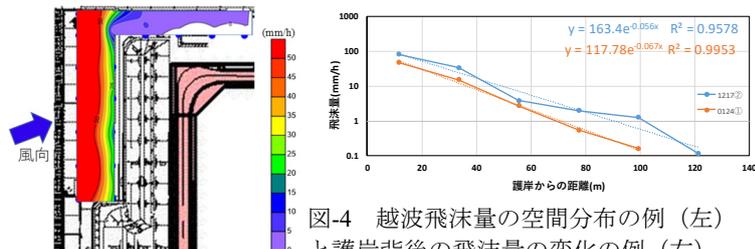


図-4 越波飛沫量の空間分布の例（左）と護岸背後の飛沫量の変化の例（右）

大規模な越波によって護岸背後に雨のように降り注ぐ越波飛沫については、雨量計により空間分布を計測した。過去の研究で得られた結果と同様に、越波飛沫量は護岸からの距離に対して指数関数的に減少することが確認された（図-4）。

護岸から離れた場所に拡散する微小な越波飛沫や海塩粒子による飛来塩分量についても同様に空間分布を計測した。計測位置の鉛直高は地上 1.5m である。図-5 に結果の例を示す。越波飛沫量と同様に護岸からの距離に対して指数関数的に減少するが、より広範囲に拡散することがわかる。

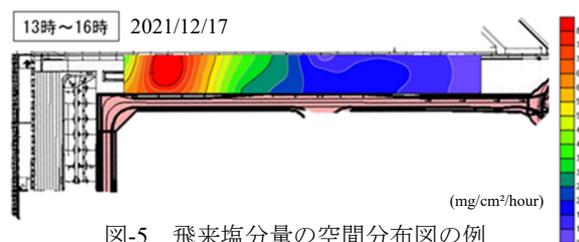


図-5 飛来塩分量の空間分布図の例

大規模な越波により発生し、護岸背後の数 100m の位置に飛来する越波飛沫を捕捉するため、感水紙に飛沫が付着する様子をビデオカメラで撮影し画像解析を行った（図-6）。画像解析では飛沫の面積と円形度が得られる。これらと飛沫の感水紙への衝突速度（現地では風速で仮定）から飛沫の水量を推定する式を室内実験により構築し、飛沫が球体と仮定して飛沫の粒径を推定

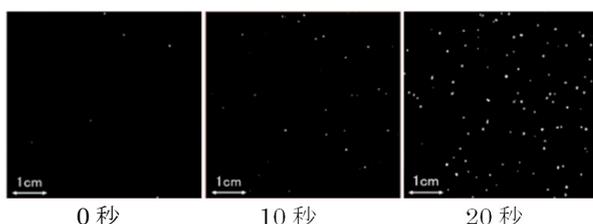


図-6 飛沫の痕跡の二値化画像（秒数は左図の撮影時からの経過時間）

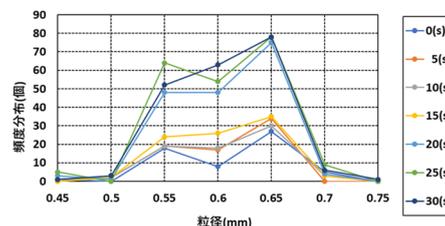


図-7 粒径頻度分布の時間変化

した。図-7 は計測結果の例で、越波飛沫の飛散状況を粒径分布の時間変化として捉えられたことは貴重といえる。

## (2) 水理模型実験結果

大きな海水滴として飛来する越波飛沫量の空間分布について再現実験を行った。模型縮尺を 1/70 とし、現地観測時の波浪状況を参考に入射波を決定し、風速については、越波実験における適切な風速の相似則が存在しないため、風速 3.0, 4.5, 9.0(m/s)の風を設定し波と同時に作用させた。図-8 に実験結果と現地観測結果 (2021 年 12 月 17 日, 2023 年 1 月 24 日) の比較を示す。風速により越波の規模と空間分布の勾配が変化しており、風速 4.5m/s のケースでは現地観測結果と比較的整合している。また、入射波、潮位、風速を変化させて実験を行い、波高や風速に加え、潮位変化の影響も比較的大きいことが分かった。さらに、縮尺の異なる模型 (1/45) での実験を実施し、模型縮尺比によるスケール効果について検討したところ、越波飛沫の実験における風速の相似性に検討の余地があるものの、比較した条件の範囲においては概ね同程度の結果であった。

高速度カメラを用いた可視化実験から、薄く打ち上がった水膜が風で膨らみ破裂して多数の微小な飛沫が発生する過程が確認された (図-9)。実際の大規模越波では、このような微小飛沫の発生過程が同時多発的に起こり、膨大な数の微小な飛沫が発生していると推測される。

## (3) 数値シミュレーション結果

有限体積法による流体解析ツールのライブラリ群である OpenFOAM を用い、薄い水膜に風を作用させて、微小な越波飛沫の発生過程の再現を試みた。使用したソルバーは VOF(Volume Of Fluid)法により多相の圧縮性流体を計算できる multiphaseEulerFoam である。図-10 に水理模型実験との比較を示す。実験結果に対して数値シミュレーションでは、水膜が膨らむ現象を再現できていないが、模型実験は約 2 cm、数値計算は 1 mm のスケールであるため、数値計算は模型実験での水膜の円弧の一部を表していると考えられる。さらに、水膜が風によって分裂し微小な飛沫が発生する様子がみ

られ、時間的な差はあるものの、風によって微小な飛沫が発生するという点については模型実験と同様の結果が得られた。

OpenFOAM を用いて、現地観測時の飛来塩分拡散を再現する 3 次元シミュレーションを実施した。

風場は標準ソルバーである pimpleFoam を用いて LES の Smagorinsky モデルを使用して計算した。風による飛来塩分の拡散には scalarTransportFoam を使用した。また、飛来塩分の拡散シミュレーションでは、実態である海塩粒子の沈降速度を考慮する必要があるが、従来のシミュレーションでは、その粒径が不明であるため定量的な評価ができていない。本研究では、現地観測で得た飛沫粒径の観測結果をもとに設定した。図-11 に現地における飛来塩分の拡散状況と数値シミュレーションによる再現計算の結果を示す。改善の余地はあるものの、護岸背後の盛土を越えて拡散する状況など、定性的には飛来塩分の拡散状況をよく再現できていることが確認された。

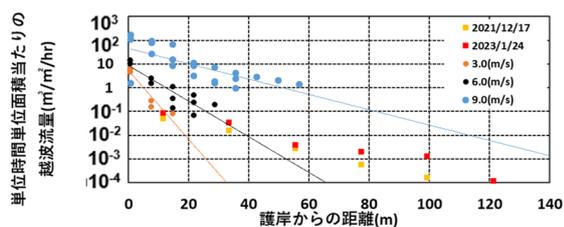


図-8 越波流量空間分布の比較

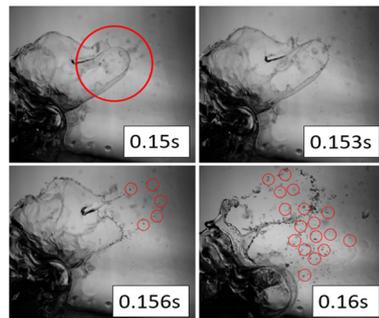


図-9 越波飛沫の発生過程

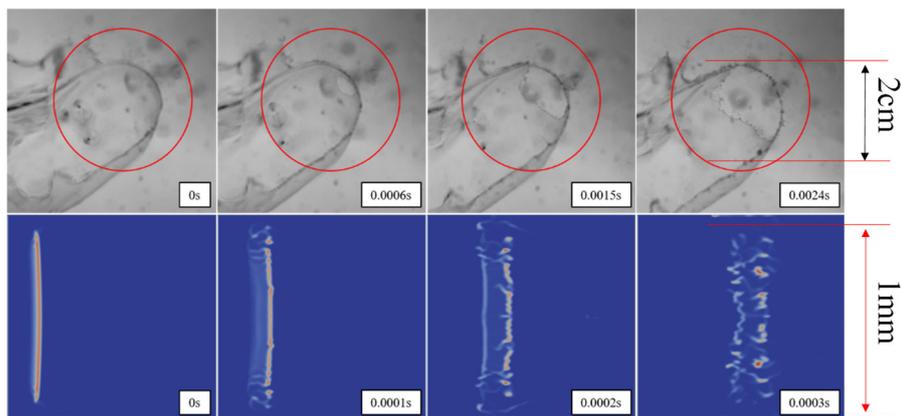


図-10 越波飛沫発生過程の模型実験とシミュレーション結果の比較

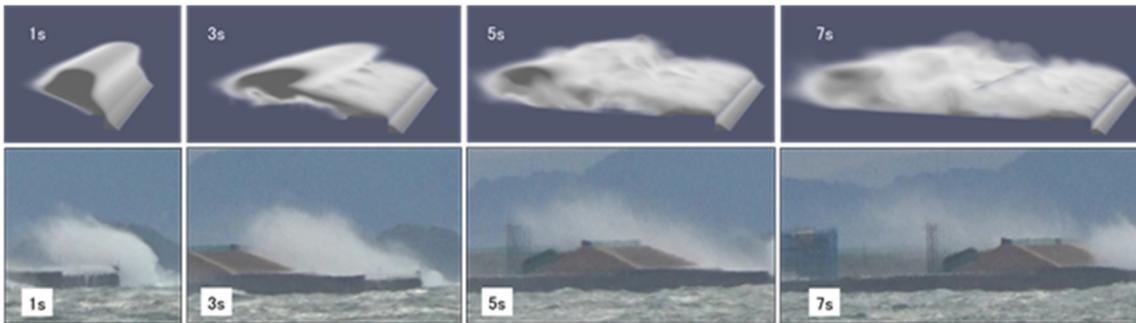


図-11 現地における飛来塩分の拡散状況と数値シミュレーションによる再現

#### (4) 越波飛沫発生過程の解明と発生量の推定

大規模越波が生じる際には、護岸上には大量の海水が流れ込み、その背後では大きな飛沫が大量に降り注ぐ、さらに護岸から離れると微小な飛沫が広範囲に拡散する。その一連の現象について、本研究で得られた結果から、越波と風の状況による護岸背後の越波流量空間分布の変化、越波飛沫の粒径分布、飛来塩分濃度と越波飛沫粒径の関連などを検討し、越波により発生し護岸背後に拡散する越波飛沫量のある程度推定できることを示した。今後はさらに観測や実験を実施しデータを蓄積するとともに、数値シミュレーションの高精度化を図り、大規模越波による飛沫量や飛来塩分量の推定精度を高める必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 横田 雅紀, 中角 航大, 山城 賢, 上久保 祐志	4. 巻 78
2. 論文標題 越波打上げ高の解析精度向上に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 1_793-1_798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.78.2_1_793	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上久保祐志, 山城 賢, 横田雅紀, 井手喜彦
2. 発表標題 簡易的な越波流量計測装置の開発と現地観測
3. 学会等名 日本沿岸域学会研究討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石丸稔基, 村木秀國, 山城 賢, 井手喜彦, 児玉充由
2. 発表標題 越波飛沫の発生と飛散に関する現地観測
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田翔喜, 山城 賢, 児玉充由
2. 発表標題 直立堤で生じる越波飛沫の発生および飛散に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村木秀國, 山城 賢, 井手喜彦, 児玉充由
2. 発表標題 大規模な波の打上げにより生じる越波飛沫の現地観測
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上久保祐志, 山城 賢, 横田雅紀, 井手喜彦
2. 発表標題 風の影響による越波の空間分布に関する実験
3. 学会等名 日本沿岸域学会研究討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村木秀國, 石丸稔基, 山城 賢, 井手喜彦, 児玉充由
2. 発表標題 大規模な波の打上げに伴う越波飛沫の飛散過程に関する研究
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坪内基起, 石丸稔基, 村木秀國, 山城 賢, 井手喜彦, 児玉充由
2. 発表標題 越波飛沫粒径の現地観測の試み
3. 学会等名 令和5年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 村木秀國, 山城 賢, 井手喜彦
2. 発表標題 越波による飛来塩分の数値シミュレーション
3. 学会等名 令和5年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	上久保 祐志  (KAMIKUBO Yuji)  (90332105)	熊本高等専門学校・企画運営部・教授   (57403)	
研究分担者	横田 雅紀  (YOKOTA Masaki)  (60432861)	九州産業大学・建築都市工学部・准教授   (37102)	
研究分担者	井手 喜彦  (IDE Yoshihiko)  (60866680)	九州大学・工学研究院・助教   (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------