

直立護岸における越波飛沫の発生過程に関する実験的研究

山城, 賢

九州大学大学院工学研究院附属アジア防災研究センター : 准教授

山田, 翔喜

九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

古賀, 健太郎

九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻

児玉, 充由

九州大学工学部技術部計測・分析技術室

他

<https://hdl.handle.net/2324/7178630>

出版情報 : Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering). 76 (2), pp.I_847-I_852, 2020-11-04. 土木学会

バージョン :

権利関係 : © 2020 by Japan Society of Civil Engineers



直立護岸における越波飛沫の発生過程に関する実験的研究

山城 賢¹・山田 翔喜²・古賀 健太郎²・児玉 充由³
上久保 祐志⁴・横田 雅紀⁵

¹正会員 九州大学大学院准教授 アジア防災研究センター (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

E-mail:yamashiro@civil.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

³九州大学 工学部技術部計測・分析技術室 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)

⁴正会員 熊本高等専門学校准教授 建築社会デザイン工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

E-mail:kamikubo@kumamoto-nct.ac.jp

⁵正会員 九州産業大学准教授 建築都市工学部都市デザイン工学科
(〒813-8503 福岡県福岡市東区松香台2-3-1)

E-mail:m.yokota@ip.kyusan-u.ac.jp

本研究では、海岸構造物での越波にともない発生する飛沫（越波飛沫）の発生過程を解明することを目的に、断面2次元造波風洞水路を用いた可視化実験を行った。水路内に直立護岸の模型を設置し、不規則波と風を同時に作用させて、不規則波中の特定の個別波による越波飛沫の発生状況を可視化して高速度カメラで撮影した。対象とした波は不規則波中の打上げ高と越波量が異なる4つの個別波で、それぞれ風速が異なる3ケースについて計測した。撮影した画像から、打ち上がった水塊が風によって膜のように広がり、最終的に破裂して小さな飛沫が多数発生すること、打上げ高が高く風速が大きいほど、多数の微小な飛沫が発生し広い範囲に飛散することなど、越波飛沫の発生過程に関する多くの知見を得た。

Key Words : wave-overtopping, splash, vertical seawall, model experiment, image analysis

1. はじめに

海水の塩分を含む潮風は、鉄筋コンクリート構造物等の腐食・劣化、農作物の枯死・減収、広域に及ぶ停電など、多岐にわたって塩風害を引き起こす。道路や橋梁等の社会基盤の長寿命化や農業生産の確保が喫緊の課題である我が国において、塩風害は今後一層重大な問題になると考えられる。防波堤や護岸等の海岸構造物は波浪制御等の役割を果たす一方で、塩風害の原因となる大量の海塩粒子（微小な海水飛沫）の発生源となり得る（写真-1参照）。越波飛沫の発生・飛散過程の解明は塩風害対策の重要な基礎的検討であり、これに関連する既往の研究としては、直立壁面で生じるFlip-Through型鉛直ジェットにより発生する飛沫を対象に、可視化実験と画像計測法により発生機構や分裂過程について検討した渡部らの一連の研究^{1,2)}、海岸構造物の維持管理の観点から、構造物に波が作用した際に発生する海水飛沫について可視化実験を行い、画像解析により飛沫の発生条件や発生個数の時間変化等について検討した武田らの一連の研究³⁾、^{4,5)}などが挙げられ、これらの研究により、波が直立壁



写真-1 現地での越波飛沫の例

に作用し激しく打ち上がった際の飛沫の発生過程や飛沫の粒径分布などに関して有用な知見が得られている。しかし、越波飛沫の発生および飛散過程は複雑で依然として未解明な部分も多く、特に、暴風暴浪時のような強風作用下での越波飛沫については検討例が非常に少ない。著者らはこれまでに、直立護岸での越波飛沫を対象に、造波風洞水路を用いた可視化実験と画像解析による越波飛沫の計測手法を提案し、護岸背後での越波飛沫の飛散

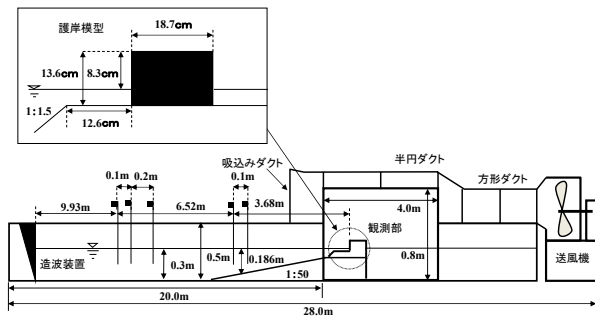


図-1 断面二次元造波風洞水路

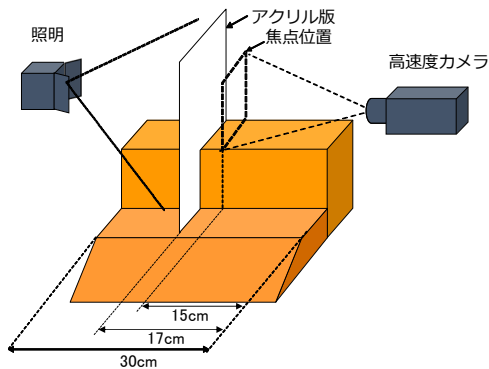


図-2 可視化の概略図

過程について検討を進めてきた⁶⁾。しかし、飛沫の発生過程については現象が非常に複雑なため、模型実験であっても観察や計測が容易ではなく十分に検討ができていなかった。本研究では、可視化実験と画像解析により、直立護岸における強風作用下での越波飛沫の発生過程の解明を試みた。

2. 越波飛沫の可視化実験

(1) 実験装置

実験には、図-1に示す反射吸収式断面二次元造波風洞水路（長さ28m、高さ0.5m、幅0.3m）を使用した。この水路は、越波や飛沫の発生状況をよく観察できるように、一部に広いガラス面（観察部）を有している。海底斜面および構造物の模型は、以前に著者らが観測を実施した現地の直立防波堤の条件⁷⁾を参考に縮尺1/70で作成したもので、これまでに強風作用下における不規則波中の個別波の打上げ高と越波量の関係⁸⁾、堤体背後での越波飛沫の飛散過程⁹⁾などについて可視化実験を実施した。本研究においても同じ模型を用い、直立堤を直立護岸に見立てて、越波飛沫の発生過程を対象に可視化実験を行った。なお、沖側の水深は30cmとし、図に示す位置に容量式波高計を設置し波を計測した。また、護岸模型背後の水面にスポンジを浮かべ、水面に着水した水塊（本研究では、より細かく分裂する前の状態を水塊と呼ぶこととする）や飛沫により発生する飛沫の飛散を防いだ。

(2) 越波飛沫の可視化と画像解析

越波飛沫の可視化は、堤体背後での越波飛沫の飛散過程に関する実験⁹⁾と同じ手法で実施した。水路の観察部を遮光性のテントで覆い暗室とし、図-2に示すように、撮影範囲の背後に乳白色のアクリル板を設置して、その後ろから光を照射した。光源にはメタルハライドランプ（フォトロン製）を使用し、アクリル板により光を拡散させた。飛沫の撮影には高速度カメラ FASTCAM SA4(model 500K)（フォトロン製）とレンズ Ai Micro-Nikkor 105mm f2.8s（ニコン製）を用いた。撮影の焦点およびアクリル板の位置については、水路のガラス面やアクリル板に付着する飛沫が画像解析に極力影響しないよう事前に検討して、焦点を水路ガラス面から15cm（被写界深度は約4mm）の位置とし、その2cm背後にアクリル板を設置した。

越波飛沫の計測については、不規則波中のある特定の一波による越波（打上げ）を対象に高速度カメラにより撮影し、市販のソフトウェア（ディテクト製Dipp-Macro）を用いて、映像の各フレームに2値化処理を行い、飛沫を検知して粒径と数を計測した。なお、粒径は粒子と認識した形状の長径を取っている。したがって、飛沫の形状が大きく歪んでいると円相当径に比べ大きな値となるが、飛沫が比較的小さいと球に近い形をしていることに加え、二値化画像において飛沫の輪郭だけが認識されることがしばしばあり、その場合、認識された形状の面積から求める円相当径では過小評価となるため長径を取ることとした。また、撮影領域の水路横断方向については、過去に検証し、約2.0cmの幅が解析範囲であることを確認している⁹⁾。

(3) 実験条件

著者らは以前に、同じ護岸模型について修正 Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波と風を同時に作用させて1波ごとの越波量と打上げ高を計測した⁸⁾。図-3はその一例で、有義波高 $H_{1/3}=4.5$ cm、有義波周期 $T_{1/3}=1.5$ sの入射波で、護岸上の断面平均風速 $U=3.0, 4.5, 6.0$ m/sにおける計測結果である。なお、打上げ高は堤体に設置した波高計で計測したもので、飛沫の打上げ高ではない。また、模型護岸の天端高が8.3cmであるため、それ以下の打上げ高ではほぼ越波は生じていない。この結果をもとに、越波量と打上げ高の組み合わせが異なる4種の個別波（wave1～wave4）を各風速についてそれぞれ選択し計測対象とした（図中の○で囲んだケース）。実験において不規則波と風を再現し、不規則波中に現れる wave1～wave4 による越波を可視化して高速度カメラで撮影した。実験は各条件につき5回行った。

越波飛沫の撮影領域を図-4に示すとおり設定した。護岸上部の打上げが生じる部分は、全体的に撮影できるよ

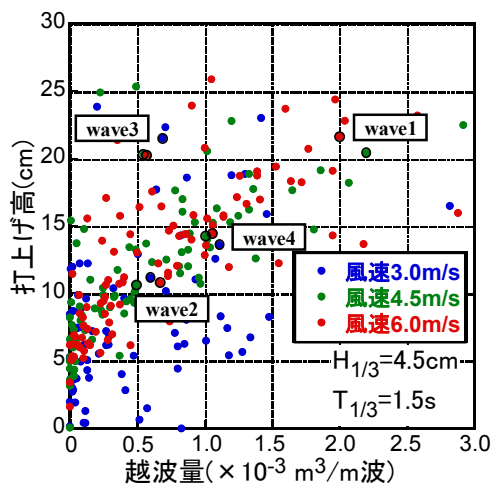


図-3 不規則波中の一波ごとの越波量と打上げ高の関係⁹⁾

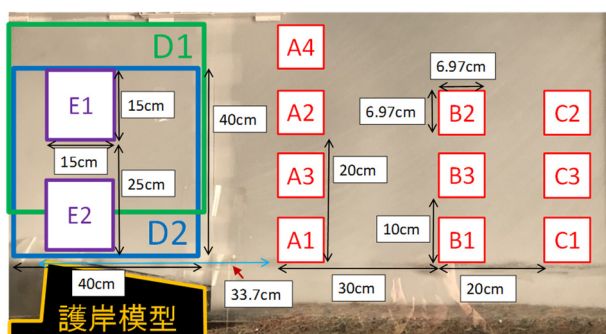


図-4 撮影領域

う広い領域D1, D2を設定し、その領域内での飛沫の発生状況の詳細を撮影するために小領域E1, E2を設定した。A1からC3は護岸背後の飛沫の飛散状況を撮影した領域である。また、高速度カメラのフレームレートとシャッタースピードは、過去の実験⁹⁾を参考に、それぞれ3,600 fps, 1/178,000sとした。

3. 越波飛沫の発生過程に関する考察

(1) 越波飛沫の発生状況

本研究では、図-4に示すとおり護岸背後の領域についても越波飛沫の計測を行ったが、本論文では、主に護岸上部での越波飛沫の発生過程について検討する。

図-5に護岸上の計測領域D2での撮影画像を示す。風速 $U=4.5 \text{ m/s}$ での wave1~wave4 および風速 $U=6.0 \text{ m/s}$ の wave1 のケースで、打上げの初期の段階から 0.1 s 間隔の連続画像である。前述のとおり、各ケースについて実験は5回行っているが、そのうちの1回の連続画像である。全体的に波が高く打ち上がりつつ、強風により陸側へ押されながら分裂した飛沫が飛散している様子が捉えられている。wave1 は、図-3に示すとおり打上げ高と越波量がともに大きい個別波で、大量の水塊が打ち上がってい

る。打上げの先端の部分では水塊から分裂した飛沫が早い速度で上昇する。この飛沫は、波が直立壁に衝突した際に発生するものであり、他の個別波のケースでも同様にみられる。その後、水塊が連続的に上昇しつつ、強風により大小様々な飛沫や水塊に分裂し飛び散っていく。しかし、ある程度以上の大きさを維持している水塊や比較的大きな飛沫は護岸背後の近い範囲に落下し遠くには飛散しない。wave2 は対象とした個別波で打上げ高、越波量がともに小さいケースである。したがって、あまり高く打ち上がらず、打ち上がった水塊の上部で飛沫が発生しているようにみえる。wave3 は、越波量は少ないものの打上げ高が高いケースであるため、飛沫が勢いよく高く打ち上がっているが、wave1 に比べて打ち上がる水塊の厚みが薄く、強風で吹き飛ばされるため、護岸の直背後に落下する水量が少ない。wave4 は打上げ高、越波量ともに wave1 と wave2 の中間の規模であり、連続画像から飛沫の発生状況も wave1 と wave2 の中間程度であることがわかる。wave1 の風速 $U=6.0 \text{ m/s}$ のケースをみると、0.00 s の画像では、風速 $U=4.5 \text{ m/s}$ のケースと同じような状況であるが、0.10 s になると、水塊の分裂や飛沫の発生状況が明らかに異なり、より激しく、より早く水塊が分裂し、大量の飛沫が飛散している様子が見て取れる。

図-6 は、図-5 の各画像について解析した飛沫粒径のヒストグラムである。なお、本研究で使用した画像解析ソフトでは、粒径が 0.5 mm 未満及び 5.00 mm 以上の飛沫は一纏めになるため除外している。したがって、図-6 は、大きな飛沫や水塊は含まず、撮影範囲内での解析対象である飛沫の個数についての時間変化を示している。図より、全体的に小さな飛沫が多い粒径分布となっており、打上げの過程に応じて飛沫個数が増減していることがわかる。ここには示していないが、0.05 s などのより細かい時間間隔での画像や飛沫粒径のヒストグラムも含めて風速 $U=4.5 \text{ m/s}$ の wave1 と wave3 を比較すると、wave3 の方が飛沫個数の増加が早く、薄い膜のように打ち上がる形態によって、飛沫が発生しやすいといえる。wave1 について、同様により細かい時間間隔の結果を含めて風速 $U=4.5 \text{ m/s}$ と 6.0 m/s を比較すると、風速が大きいほど飛沫個数の増減の過程が早まっており、風速が飛沫の発生過程に大きく影響することがわかる。

図-7 は、wave1 における風速が異なる場合の護岸背後(A1, C1)での飛沫個数密度分布の比較である。飛沫個数密度とは、ある計測領域に1回の越波で飛来してくる飛沫の個数を、計測領域の面積(1辺 6.97 cm)と水路横断方向の計測幅(2.0 cm)で除した単位体積あたりの飛沫の個数である⁹⁾。また、図-7に示す分布は、同じ条件で5回実施した実験結果の平均である。過去の検討において、飛沫個数密度分布は指数分布で良好に近似できることが示されたが、風速 $U=6.0 \text{ m/s}$ のケースでは、特に小さな

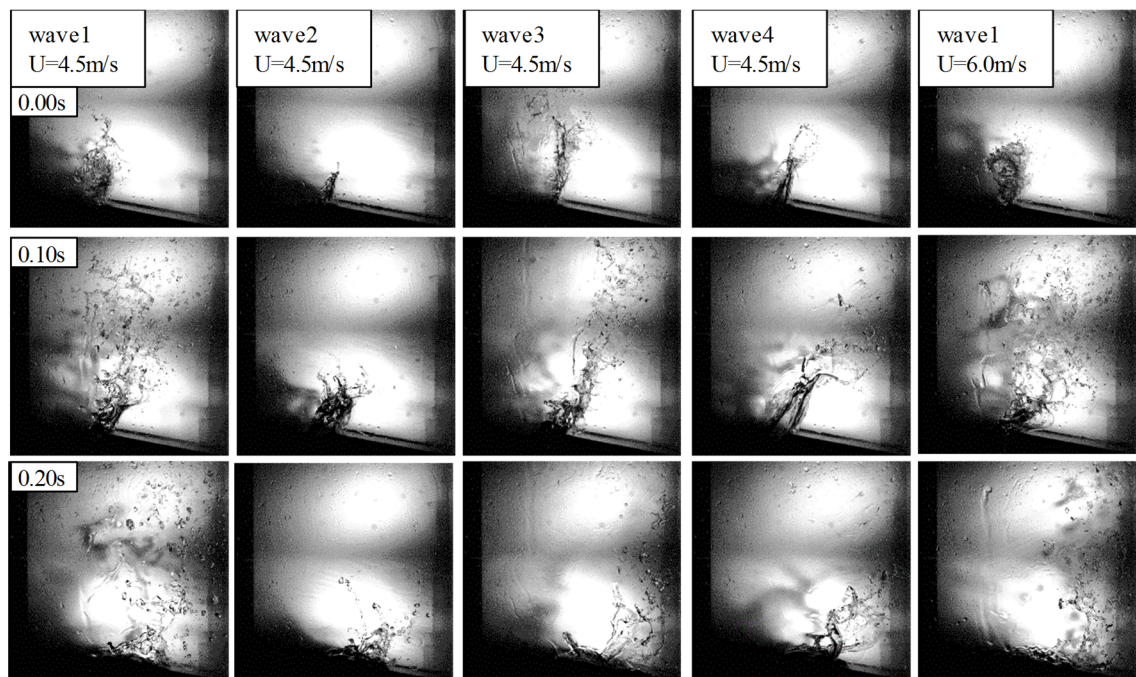


図-5 越波飛沫の発生状況（計測領域 D2）

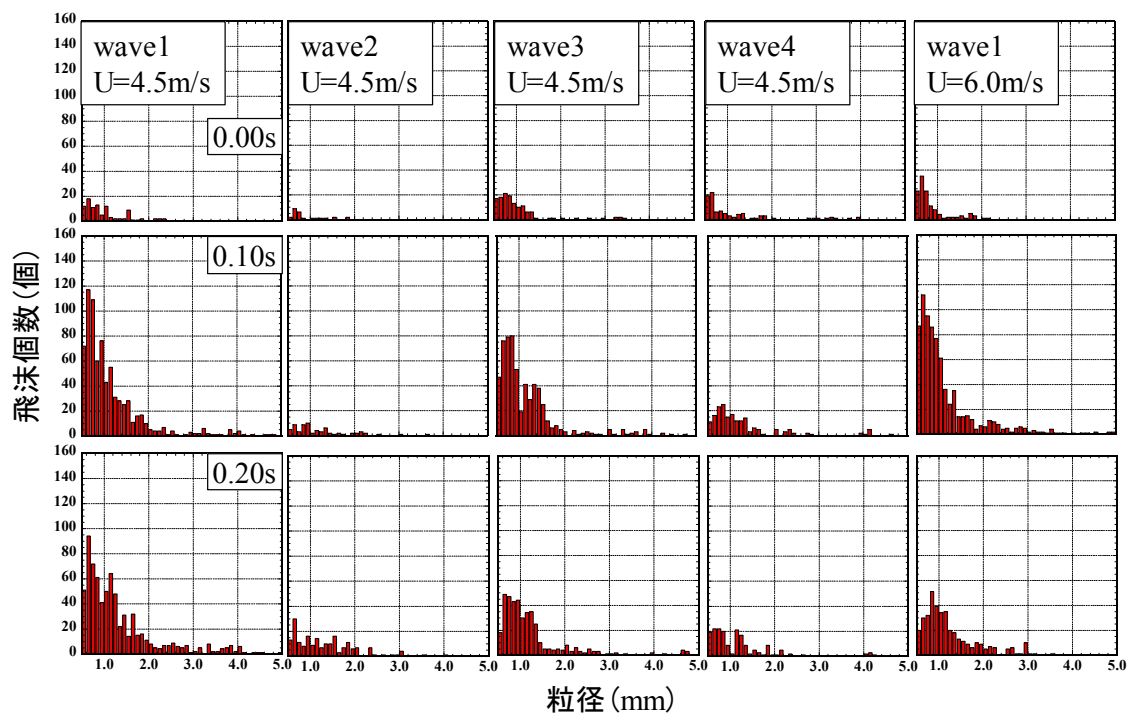


図-6 飛沫粒径のヒストグラム（計測領域 D2）

飛沫について指数分布よりも大きな数値を示しており、計測領域 A1 においては、粒径が 1.3～3 mm の範囲で指数分布を下回っている。これは他のケースではほとんど見られなかったことで、今後の検討としたい。風速が異なることによる飛沫個数密度分布の違いに着目すると、護岸から離れるほど風速が大きい $U=6.0\text{ m/s}$ のケースで飛沫個数密度が大きいことがわかる。逆に護岸に近い領域では、A1 だけではなく A2～A4 の領域においても風速 $U=4.5\text{ m/s}$ のケースで全体的に飛沫個数密度が大きい傾向

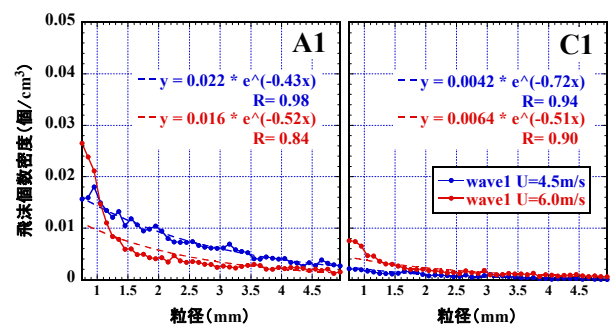


図-7 護岸背後における飛沫個数密度分布の比較

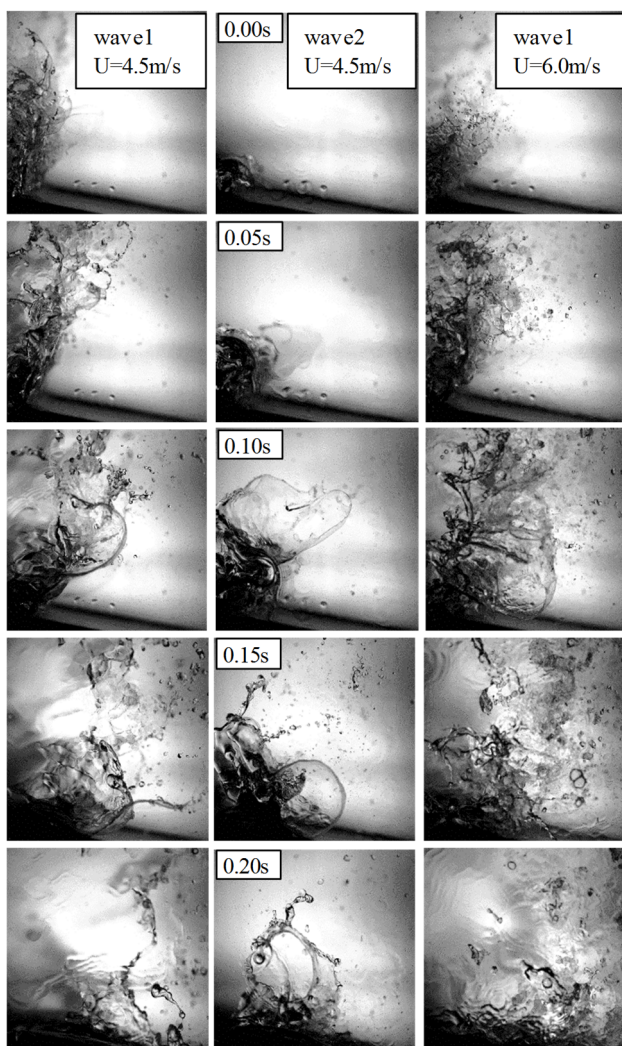


図-8 越波飛沫の発生状況（計測領域E2）

がみられたが、撮影画像や実験時の観察から、風速 $U=6.0\text{ m/s}$ のケースでは、多くの飛沫が計測領域A4よりも高い位置を飛散したためと考えられる。これらの結果は、越波飛沫は風速が大きい程発生しやすく、護岸背後の広い範囲に運ばれることを示している。

(2) 越波飛沫の発生過程

図-8は、風速 $U=4.5\text{ m/s}$ でのwave1とwave2および風速 $U=6.0\text{ m/s}$ のwave1のケースにおける計測領域E2での連続画像である。図-5に同じ条件におけるD2での連続画像があるが、それとは別に実験を行って撮影したものであるため、図-8は図-5の一部を拡大したものではなく、条件が同じでも完全に同じ状況ではない。また、図-8はより狭い範囲に着目して撮影しているため、図-5に比べて解像度が高い。これらの図は、風の作用によって打ち上がった水塊から飛沫が発生する状況を捉えているが、その過程は非常に複雑である。図-9は、図-8の各画像について解析した飛沫粒径のヒストグラムであり、例えば、wave2の $U=4.5\text{ m/s}$ のケースでは0.10 sから0.15 sにかけて小

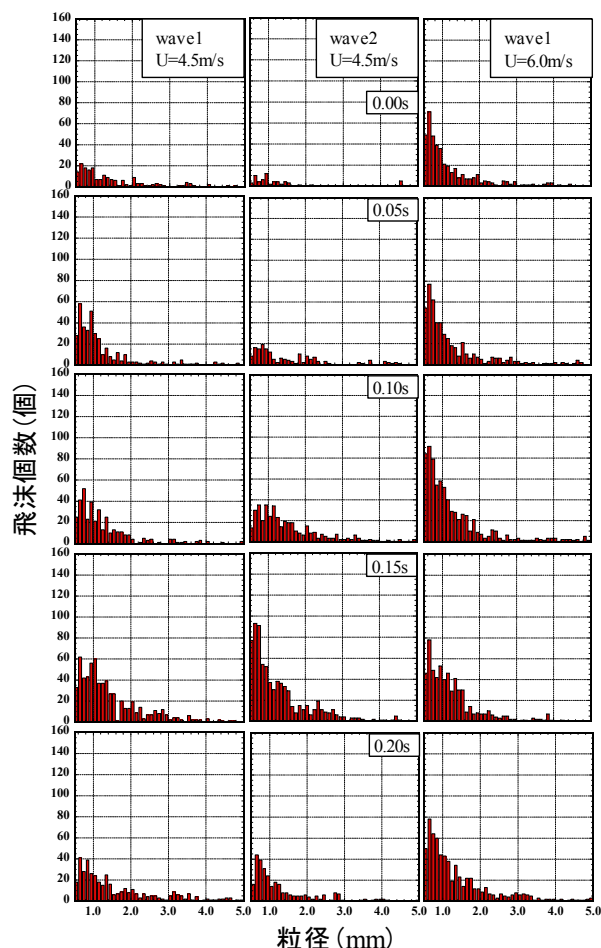


図-9 飛沫粒径のヒストグラム（計測領域E2）

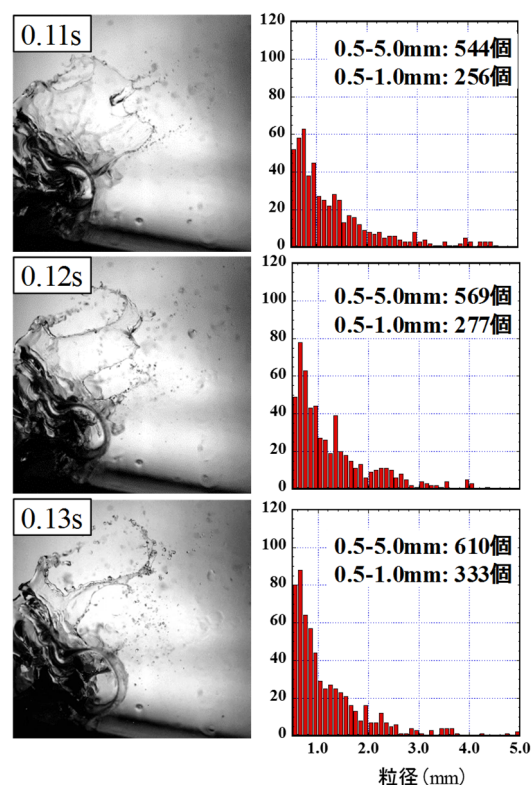


図-10 水塊が破裂し飛沫が発生する様子および飛沫粒径のヒストグラム（wave2, 計測領域E2）

小さな飛沫の数が急増している。この間をより細かく0.01s 間隔で示したのが図-10であり、対応する飛沫粒径のヒストグラムも併せて示している。また、ヒストグラムには、解析対象である0.5～5.0 mmの飛沫の総数および微小な飛沫として、0.5～1.0 mmの飛沫の個数を示している。この図より、打ち上がった水塊が風によって膜のように広がり、最終的に破裂して小さな飛沫が多数発生する様子が確認できる。図-8のwave1で風速 $U=4.5$ m/sと6.0 m/sのケースについては、連続画像から飛沫発生の詳細を把握することが難しいが、撮影した画像を細かくみると、波が高く打ち上がる一連の過程のなかで、水塊が風で広がり破裂して多数の微小な飛沫を生じる状況が頻発していることが確認された。さらに、そのようにして発生した飛沫は、移動速度が大きく様々な方向へ飛散する。この越波飛沫の発生過程は、wave3のように水塊が薄く高く打ち上がり、風速が大きいくほど起こりやすく、発生した飛沫は護岸背後の広い範囲に運ばれる。

4. おわりに

本研究では、断面2次元造波風洞水路を用いて、直立護岸で発生する越波飛沫の可視化実験を行い、画像解析を用いて飛沫の粒径分布を調べ、越波飛沫の発生過程の解明を試みた。その結果、打ち上がった水塊が風によって膜のように広がり、最終的に破裂して小さな飛沫が多数発生すること、打上げ高が高く風速が大きいくほど、多数の微小な飛沫が発生し広い範囲に飛散することなど、越波飛沫の発生過程に関する多くの知見を得た。ただし、現状は定性的な越波飛沫の発生メカニズムを理解した段階であり、今後より詳細な検討が必要である。また、従来の指摘のとおり、越波飛沫の模型実験においては風速の相似則が確立されていないため、本実験は現地の越波

飛沫の厳密な再現とはいえない。しかしながら、越波飛沫の発生過程については、現地観測が困難であり、現時点では数値計算による再現も極めて難しいことから、本研究により得られた知見は、現地での現象の解明に資する有用な成果であるといえる。

参考文献

- 1) 渡部靖憲, 石崎真一郎: Flip-through 型越波飛沫のサイズスペクトル, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.76-80, 2008.
- 2) 渡部靖憲, 石崎真一郎: 越波ジェットのフィンガー化と飛沫への分裂過程, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.65, No.1, pp.11-15, 2009.
- 3) 武田将英, 魚住健治, 重松孝昌, 津田宗男, 羽瀨貴士, 網野貴彦: 鉛直壁の波作用時に発生する飛沫特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 67, No.2, pp.1_673-1_678, 2011.
- 4) 武田将英, 魚住健治, 重松孝昌, 津田宗男, 羽瀨貴士, 網野貴彦: 鉛直壁に波が衝突した時の飛沫の発生条件に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.1_701-1_705, 2011.
- 5) 武田将英, 川瀬恭平, 重松孝昌, 津田宗男, 羽瀨貴士, 網野貴彦: 鉛直壁に波が衝突したときの飛沫の発生過程モデルの可能性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1_946-1_950, 2014.
- 6) 山城 賢, 仲村 渉, 小川大輔, 児玉充由, 上久保祐志, 横田雅紀: 越波飛沫の輸送過程に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No.2, pp.847-852, 2017.
- 7) 山城 賢, 吉田明徳, 日高倫興, 見國洋平, 西井康浩: 消波ブロックによる直立堤での飛来塩分発生量の低減効果に関する現地観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.736-740, 2010.
- 8) 山城 賢, 改田将平, 知念 卓, 吉田明徳: 風作用下での越波量の出現頻度に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.1_771-1_775, 2013.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

EXPERIMENTAL STUDY ON GENERATION PROCESS OF SPLASHES DUE TO WAVE RUN-UP AT A VERTICAL SEAWALL

Masaru YAMASHIRO, Shoki YAMADA, Kentaro KOGA, Mitsuyoshi KODAMA, Yuji KAMIKUBO and Masaki YOKOTA

In this study, model experiments were conducted using a two-dimensional wind-wave flume to clarify the generation process of splashes due to wave-overtopping at a vertical seawall. In the model experiment, the wave run-up splashes were visualized by backlight method and taken with a high-speed camera. Four individual waves in an irregular wave train which have different run-up heights and wave-overtopping quantity were selected for measurement. Wind speed was set to 3.0, 4.5 and 6.0 m/s. From the experimental data, the generation process of splashes was clarified. In the process of a wave run-up, relatively large water mass is swelled up due to wind like a balloon, and consequently bursts. The burst generates a large number of small splashes. The number of splashes increases as the wind speed and the run-up height increase, and the small splashes are dispersed over wider area behind the seawall.