

海岸構造物での波の打ち上げに伴う海水飛沫の生成過程

Generation Process of Sea Water Splash Accompanying Wave Run-ups Occurring at Coastal Structures

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 山城 賢

九州大学大学院工学研究院環境社会部門

助教 横田 雅紀

（研究計画ないし研究手法の概略）

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となるであろう。ところで、台風来襲時のニュース等で、岸壁から大量に飛び散る海水飛沫の映像を目にするが、その映像にあるように、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。しかし、その発生過程は複雑で未解明である。以上より、本研究では、海岸構造物での波の打ち上げに伴う海水飛沫の生成過程について、水理模型実験により解明することを目的とする。

沿岸部で塩風害を引き起こす潮風に含まれる塩分（飛来塩分）の実体は、近隣の海岸で発生した粒径が数100 μm 以下の微小な海水飛沫（海塩粒子と呼ばれる）である。海岸構造物での激しい波の打ち上げ（越波）に伴って発生する大量の海塩粒子について、その生成過程を現地で直接的に観測することは極めて困難であり、条件を制御できる水理模型実験が現実的な検討手段となる。しかし、縮尺模型を用いる水理模型実験では、構造物への波の衝突速度や水塊が打ち上がる際の上昇速度が小さくなるなど、幾つかの制約により現地で発生する極めて微小な海塩粒子を再現できない。そこで、本研究では、模型実験で生じる程度の大きさの飛沫について生成過程を明らかにすることを試みた。実験は、越波の出現特性および飛沫の分裂・輸送過程を調べるため、波と風を同時に発生可能な断面2次元造波風洞水路に典型的な直立護岸の模型を設置して行い、越波や飛沫を可視化して高速度カメラで撮影した。撮影した映像に画像解析を適用して、越波と飛沫の計測を行った。

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 越波の出現特性

(1) 計測手法の概略および実験条件

断面2次元造波風洞水路に設置された護岸模型の前面での流体運動（波の打ち上げや越波）を可視化し、高速度カメラ（フレームレート400fps、シャッター速度1/500s）で撮影する。次いで、護岸天端の高さに検査ラインを設け、撮影した映像からPIV（Particle Image Velocimetry）により検査ライン上の複数点で鉛直流速の時系列を求める。得られた流速の時系列を検査ラインについて積分すれば、検査ラインを上下に通過する水量の時系列が得られ、さらに1周期間で積分すれば、1波当りの正味の越波量が求められる。この時、ある1波の作用時間は、護

岸の壁面に沿って計測した水位変動データから判断する。なお、PIVにより得られる流速には、水面の乱反射等による異常値や欠測が含まれるため、それらを取り除く。また、実験の際には、護岸背後に越波升を設置し、それによって計測した累積越波量をもとに、PIVで得た流速を補正する。

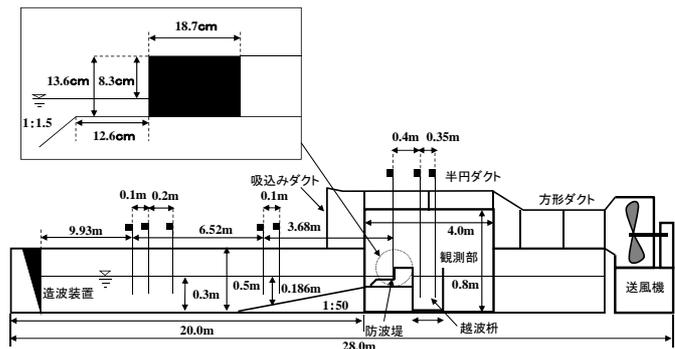


図-1 実験装置

実験には図-1に示す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。この水路内に海底斜面および直立堤の模型を作成した。水深は30cmとし、入射波は修正Bretschneider-光易型スペクトルを有する5種類の不規則波で、有義波高と有義波周期は $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (3.14\text{cm}, 0.84\text{s}), (4.5\text{cm}, 1.0\text{s}), (4.5\text{cm}, 1.2\text{s}), (4.5\text{cm}, 1.5\text{s}), (5.7\text{cm}, 1.0\text{s})$ とした。風の条件は、護岸壁面の位置での静水面上20cmと30cm（それぞれ天端上11.7cm, 21.7cm）における風速を平均したものを代表風速として、0.0m/s（無風）、3.0m/s、4.5m/s、6.0m/sの4通りを設定した。したがって、

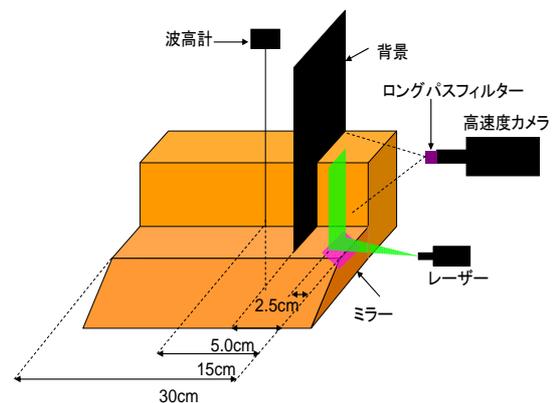


図-2 堤体前面部の可視化の概略

実験は入射波と風を組み合わせた20ケースについて実施した。各ケースとも波と風を同時に約470秒間作用させ、その間、図-2に示すように高速度カメラによる撮影を行った。加えて、越波枡内の2か所と護岸壁面の1か所を含む水路内の計8か所において、サンプリング周波数50Hzで水面変動を記録した。データ数は23,480個である。

(2) 越波量の出現特性と風の影響

図-3に、入射波が $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (4.5\text{cm}, 1.0\text{s}), (4.5\text{cm}, 1.2\text{s}), (5.7\text{cm}, 1.0\text{s})$ の3ケースについて個別波の越波量の出現頻度分布を示す。図中には各ケースにおける越波回数、最大越波量、平均越波量、標準偏差を併せて示している。図より、全体的に波高と周期が大きい程、最大越波量および平均越波量が大きいことが分かる。また、いずれの入射波のケースも風速の増加に伴い出現頻度分布の裾が広がっており、越波回数および平均越波量が増加している。これらの傾向は他の2ケースについても同様であった。

本研究では直立堤で打ち上がる越波形態を対象としている。この越波形態の場合、打ち上がった水塊が風圧で陸側に押されるため、風により越波量が増加しやすいと考えられる。そこで図-4に、風速の二乗に対する平均越波量の変化を示した。図より、入射波が $(H_{1/3}, T_{1/3}) = (3.14\text{cm}, 0.84\text{s}), (4.5\text{cm}, 1.0\text{s})$ の2ケースにおいては風速の二乗値の変化に伴って直線的に平均越波量が増加していることが分かる。他の3ケースについては、風速の二乗が $20\text{ (m}^2/\text{s}^2)$ （風速4.5m/s）までは平均越波量が直線的に増加するが、それ以降では増加率が小さくなっていることが確認できる。この理由としては、風による越波量の増加作用には限度があり、入射波や護岸形状によってその限度が異なるものと推測される。

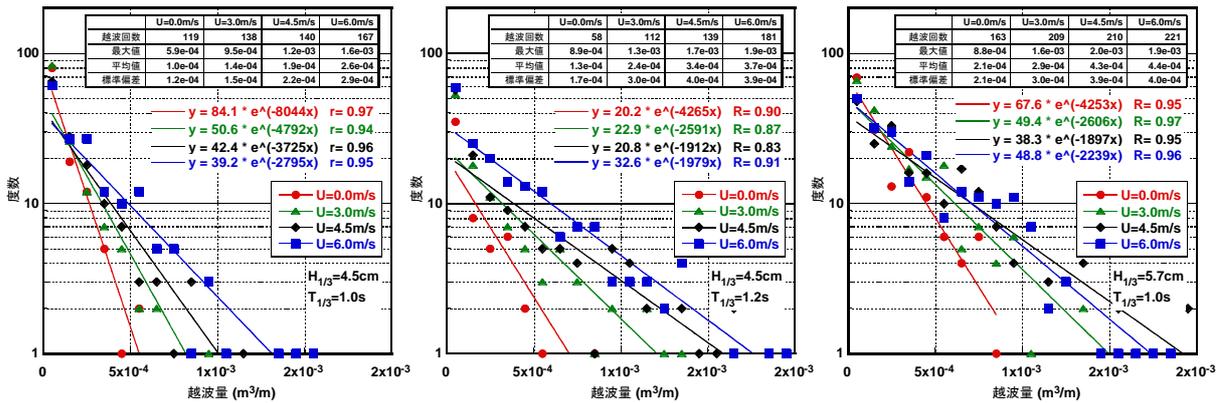


図-3 風による越波量出現頻度分布の変化

個別波の越波量の出現頻度について、井上ら¹⁾、Francoら²⁾およびVictorら³⁾は水理模型実験を行い、出現頻度が2母数のワイブル分布で表されることを示した。また、泉宮ら⁴⁾は消波護岸における越波の現地観測結果から、個別波の越波流量の出現頻度分布が、形状母数が1のWeibull分布、つまり指数分布に適合することを示した。ただし、これらの研究では風速の影響は検討されていない。図-5に本実験結果から求めた確率密度分布を3ケースについて示す。また、図中には期待値1の指数分布およびワイブル分布を併せて示している。ただし、横軸は平均越波量で基準化した越波量である。なお、ワイブル分布の形状母数 m の決定については、形状母数を0.5から1.2の範囲で0.02刻みずつ変化させ、越波量の確率密度分布への適合度について χ^2 -検定を行い、検定値が最小となる形状母数を採用した。図より、特徴的なこととして、いずれのケースも風速にかかわらず、基準化した越波量の確率密度分布が一致することが分かる。各ケース間で比較すると、周期が短い2ケースについては指数分布とワイブル分布に大差がなく、どちらの分布にもよく一致している。一方、周期の長いケ

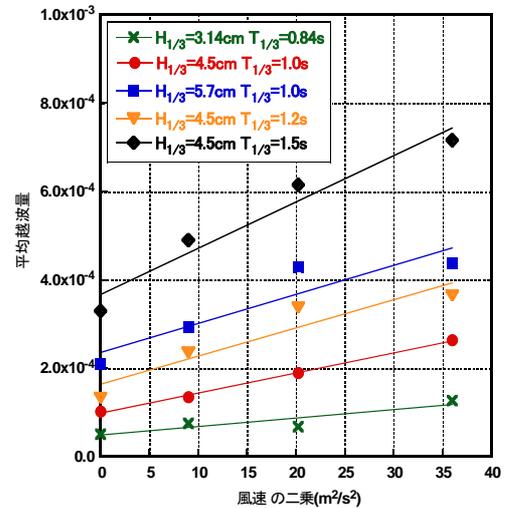


図-4 風速の二乗と平均越波量の関係

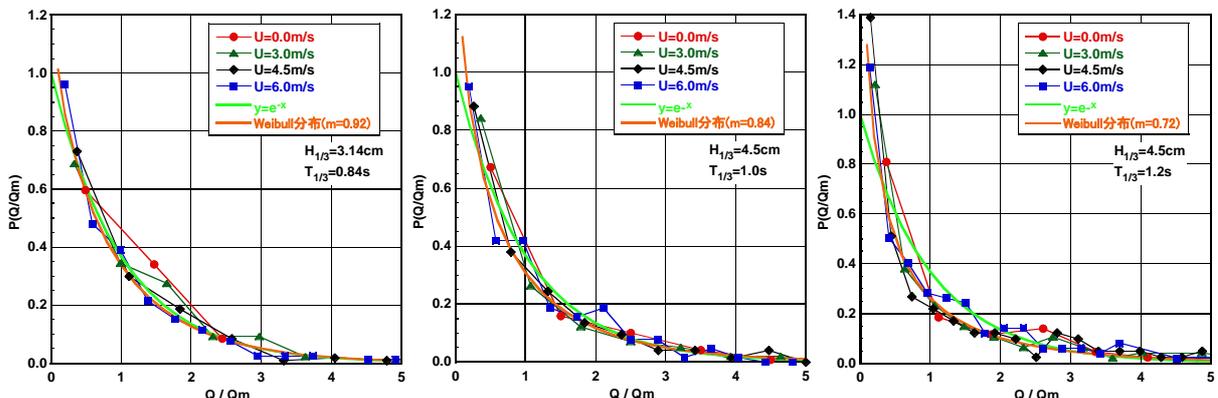


図-5 越波量の確率密度分布

ースについては越波量が小さな範囲で指数分布との差異が生じており、ワイブル分布への適合性が高い。ワイブル分布は形状母数を調整することで越波量の確率密度分布によく適合しているといえる。

2. 飛沫の分裂・輸送過程

(1) 計測手法の概略および実験条件

図-6に示すように、高速度カメラをバックライトの光源と対面するように設置し、撮影範囲を両者の間に設定した。バックライトには金属ハライドランプ（株）フォトロン製）を使用し、被写体となる飛沫と光源の間に乳白色の亚克力板を設置して光を拡散させた。なお、光源の光の強度は撮影した映像の鮮明度に強く影響するため、照明の角度や設置位置について事前に検討した。また、撮影の焦点は水路ガラス面から2cm（被写界深度は約4mm）とし、亚克力板を水路ガラス面から7cmに設置した。これについては画像解析における測定誤差を極力防ぐため、ガラス面に付着する飛沫をほぼ完全にデフォーカスし、かつ、レンズと撮影範囲の間のピントの合わない飛沫ができるだけ少なくなる距離を事前に調べて設定した。なお、水路の観察部は遮光性のテントで覆い暗室とした。

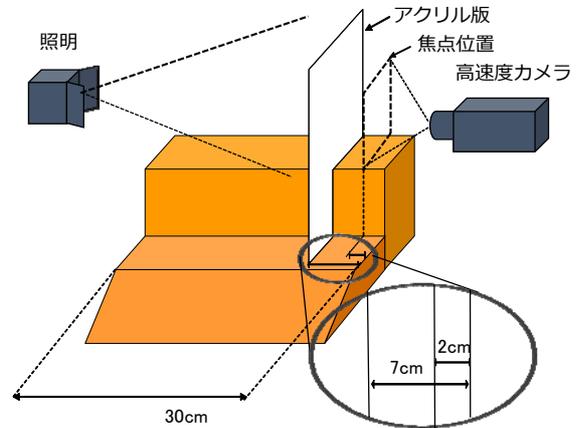


図-6 可視化実験の概略

画像解析の精度には解析対象の画質が大きく影響するため、本研究においても如何に解析に適した映像を得るかということが重要となる。カメラやレンズ等の撮影機材の性能が優れていれば、当然ながら質の高い（解析に適した）映像を得られる可能性が高くなる。本研究では、当研究室で所有している高速度カメラFASTCAM SA4(model 500K)（株）フォトロン製）とレンズAi Micro-Nikkor 105mm f/2.8s（株）ニコン製）を用い、それら機材において、できるだけ解析に適した映像を得るための撮影条件について検討した。重要な撮影条件としてはフレームレートとシャッタースピードがあり、フレームレートは映像の滑らかさに、シャッタースピードは映像のブレに影響する。安藤ら⁵⁾は、様々な被写体の動きについて適したフレームレートを示しており、それによれば、本研究で対象とする水理模型実験における飛沫の飛散については少なくとも1,000fpsが必要と考えられる。強風により飛散する飛沫を撮影するには、より大きなフレームレートが望ましいが、画像をメモリに素早く保存するために、フレームレートが大きくなると撮影される画像の解像度が小さくなり、すなわち、フレームサイズが制限される。本研究で使用したカメラの場合、例えば、2,000fpsでは最大解像度（画素数1,024×1,024）で撮影できるが、5,000fpsでは1,024×800となる。本研究では最大解像度で撮影できる最大のフレームレートである3,600fpsを採用した。

図-7は、シャッタースピードを変えて撮影した場合の比較である。本来、画面の明るさはレンズの絞りで調整できるが、被写界深度を浅くして、より断面二次元的に撮影するためには絞りを開く必要があるため、絞りで明るさを調整できない。シャッタースピードについては、速くなるほど飛沫を鮮明に撮れるが、露光が短いため画面が暗くなる。本研究では、飛沫の鮮明さと画像の明るさの兼ね合いから、図-7中図に示す1/62,000sを採用した。

本研究では、画像解析に市販のソフトウェア（(株)ディテクト製Dipp-Macro）を使用した。この解析では、まず、得られた映像から背景を除去し、飛沫を白、背景を黒で表す2値化処理を行う。ついで、2値化画像において飛沫に相当する部分を検知し粒径と数を計測する。図-8に解析した画像の例を示す。この図は、飛沫の飛散の時間経過を示しており、例えば赤丸と緑丸で示すように、飛沫が護岸背後へ飛散している様子をよく理解できる。

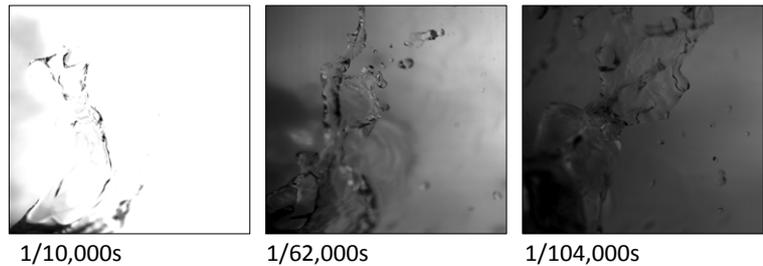


図-7 露光時間の比較

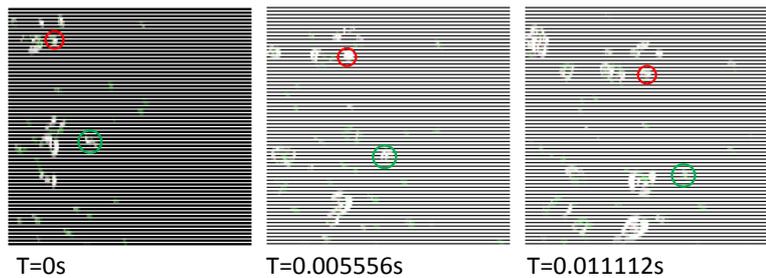


図-8 画像解析の結果の例

(2) 越波飛沫の計測結果

前述の撮影条件において、波と風を作用させ、越波飛沫の計測を行った。入射波は規則波で波高 $H=4.5\text{cm}$ 、周期 $T=1.2\text{s}$ とし、護岸上の平均風速を 6.0m/s とした。図-9に護岸背後における飛沫の粒径分布の経時変化を示す。図より、飛沫の数が越波のプロセスに伴って徐々に増加、減少する様子が見て取れる。また、飛沫の全体的な個数に係わらず、基本的に微小なものほど多く、大きなものほど少なく、その分布は指数分布で良く近似されることがわかる。

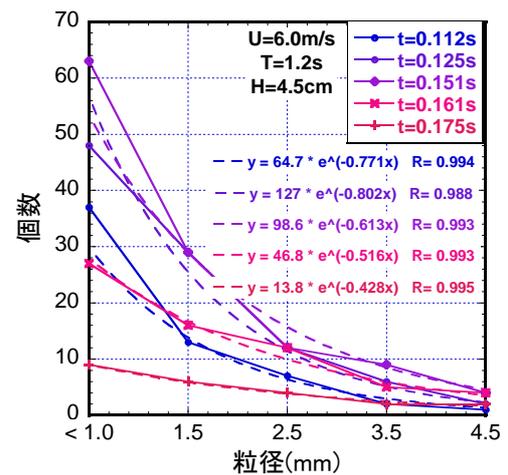


図-9 粒度分布の経時変化

3. まとめ

風が作用する条件での個別波の越波量の出現特性について、画像解析による計測手法を用いた模型実験を行い検討した。その結果、次のことが明らかとなった。平均越波量で基準化した個別波の越波量の出現確率分布はワイブル分布で表される。ただし、その形状母数は波の条件によって異なり、風は分布形状に影響しない。風は越波量そのものに影響し、平均越波量は風速の二乗に比例する。また、直立護岸で発生する越波飛沫については、飛沫の全体的な個数に係わらず、基本的に粒径分布は指数分布で表されることが示された。今後、本研究の知見をもとに、現地における越波飛沫の生成と輸送過程の解明の進展が期待される。

参考文献

- 1) 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司 (1989) : 不規則波における越波量の出現分布特性, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 618-622.
- 2) Franco, L., M. de Gerloni and J. W. van der Meer (1994) : Wave overtopping on vertical and composite breakwaters, Proc. 24th ICCE, pp. 1030-1044.
- 3) Victor, L., J. W. van der Meer and P. Troch (2012) : Probability distribution of individual wave overtopping volumes for smooth impermeable steep slopes with low crest freeboards, Coastal Engineering, Vol.64, pp. 87-101.
- 4) 泉宮尊司・濱田良平・石橋邦彦 (2006) : 消波護岸の越波流量の確率分布特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第53巻, pp. 716-720.
- 5) 安藤幸司・勝間田正資・辰野正和・中山泰喜・深瀬疆 (1996) : 流れの可視化入門, 朝倉書店, pp.164-174.

(発 表 論 文)

- 1) 仲村 渉・山城 賢・横田 雅紀, 水理模型実験による越波飛沫の計測法について, 平成27年度土木学会全国大会 第70回年次学術講演会, 2015 (発表予定) .