

鉛直壁に波が作用する際に発生する飛沫の特性の時・空間分布に関する研究

A STUDY ON TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTION OF CHARACTERISTICS OF SPLASH GENERATED BY IMPACT OF WAVE ON A VERTICAL WALL

河海工学分野 川瀬恭平

棧橋や護岸などの構造物に波が作用する際に発生する海水飛沫の特性は、未だ十分に把握されていない。本研究では、高速度カメラを用いて鉛直壁に波が作用する際に発生する飛沫の生成過程を撮影し、飛沫の特性分布の知見を得ること、飛沫特性をモデル化することを目的とする。本研究によって、PTV 画像解析手法を適用することによって、飛沫の総発生個数だけでなく飛沫径・飛散速度・飛散方向の時・空間分布特性を把握することが可能となった。

It is not fully knowledge that characteristics of sea spray generated by waves dashind against a pier and seawall . In this study , laboratory experiments were carried out by using two high-speed cameras to capture images if generation process of spray when reguler waves attack an impermeable vertical wall on 1:30 slop . It is intended to gained Distribution of and modelling of Characteristics of Splash Generated by Impact of Wave on a Vertical Wall . The acctually measure number of droplets by extraction scatterfly out from images . Number of droplets is a function of time by Gomperts-curve .

1 はじめに

近年、沿岸域に存在する鉄筋コンクリート製構造物の塩害による早期劣化が問題視されている。塩害とは、海水飛沫などに含まれている塩化物イオンが原因となり、鉄筋コンクリート中の鉄筋が腐食し、コンクリートにひび割れが起こる劣化現象である。港湾構造物の中でも特に棧橋はその床版を支える杭に波が作用する際に飛沫が発生するため、塩化物イオンが付着しやすい環境にある。日常的に海水に浸水している構造物よりも鉄筋が腐食しやすく、塩害劣化の進行が速いといわれている。

今後、公共事業への投資が一層抑制されることが想定されるなか、塩害に対する港湾構造物の適切かつ効率的な維持管理計画を立てることが求められる。構造物への塩化物イオンの供給量を把握するためには、その原因となる海水飛沫の特性を理解することが不可欠である。既往の研究によれば、海水飛沫の発生要因として、海水面の風応力の作用と構造物表面上におけるせん断応力が挙げられる [1]。魚住 [2] は後者の要因によって発生する飛沫を対象として、鉛直壁に波が作用する過程を高速度カメラで撮影し、発生する飛沫の特性量と飛沫個数、飛沫径等に関する知見を得ている。また、武田 [3] らは実験の再現計算を行うことにより、

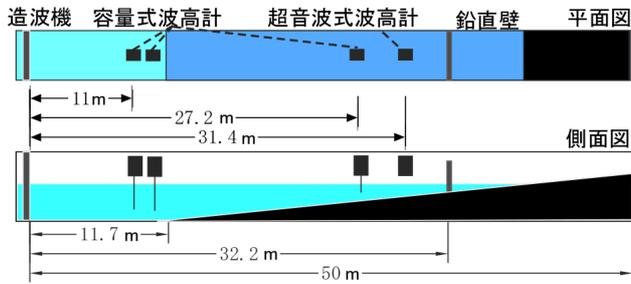
飛沫が発生する主要な要因として構造物への波の作用速度が関わっていることを示唆している。渡部 [4] らは直立模型に碎波波浪が作用した時に発生するフィンガージェットと飛沫への分裂過程を高速度カメラによって撮影することにより、飛沫の生成過程及び、飛沫のサイズスペクトルに関する知見を得ている。

しかし、未だ飛沫に関する知見は十分でない。そこで、本研究では、波の海表面に近接している棧橋や護岸などの港湾構造物への塩化物イオンの供給量を定量的に把握することを目標とし、鉛直壁に波が作用する際に発生する飛沫の画像計測を行い、撮影画像から飛沫の時・空間分布特性を把握することを目的とした。

2 鉛直壁への波作用時に発生する飛沫の波浪条件

2.1 実験概要

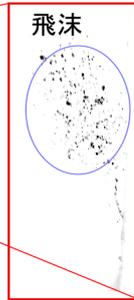
実験は長さ 50m、幅 1.0m、高さ 1.5m の片面ガラス張りの二次元造波水槽を用いて行った。水槽内には造波機から 12.7m 離れた地点から 1:30 の斜面が設けられており、水平床部の水深を 0.71m として実験を行った。さらに、水深 $h_0 = 0.06\text{m}$ の位置に高さ 0.28m の鉛直不透過壁を設置し、これに規則波を作用させた。発生させた規則波の周期は $T = 1.6 \sim 2.05\text{s}$ 、水平床部における波高 $H_0 = 0.037 \sim 0.106\text{m}$ 、波形勾配 $H_0/L_0 = 0.007 \sim 0.022$ である。飛沫の発生特性を把握するため



(a)実験概要図



(b)実験風景



(c)撮影画像

図-1. 実験概要図

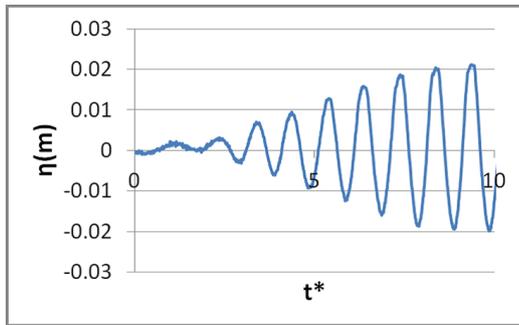


図-2. 水平床上における水位変動の時系列変化の例

2台の高速度カメラを用いて撮影を行った。高速度カメラの撮影条件は、撮影速度 1000fps、露光時間 10^{-3} s とした。計測解像度は、 5×10^{-4} m/pixel であった。撮影画像（以下原画像とする）は上下 1280pixel 左右 512pixel の大きさに右下端に原点を取り、水平方向左向き（冲向き）に x 軸を、鉛直上向きに y 軸を取る。

造波開始直後の水平床上における波高は図-2 のように除所に大きくなるので、セロアップクロス法で個別波に分解し、表-2 に示すように 1 波毎の H_n を求めた。表-2 の赤文字の波浪が鉛直壁に作用した時に飛沫が発生した。

3 鉛直壁への波作用時に発生する飛沫の解析手法

実験により撮影された画像から飛沫のみを抽出し、特性量を解析するためのプログラムを作成した。

3.1 飛沫の抽出手法

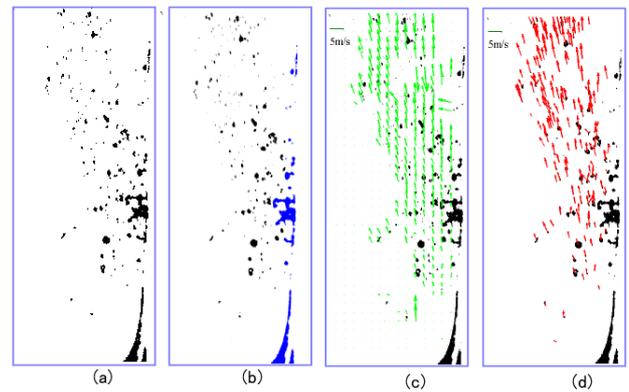
本研究では、鉛直壁に沿って波が打ち上がり波峰から液滴状になったものを飛沫として扱うこととした。

表-1. 作用波諸元

case	h_0 [m]	T [s]	H_0 [m]	L_0 [m]	H_0/L_0 -
1	0.71	1.9	0.037	4.35	0.008
2	0.71	1.9	0.048	4.35	0.011
3	0.71	1.9	0.058	4.35	0.013
4	0.71	1.9	0.096	4.35	0.022

表-2. 実験結果

case	H_1 [m]	H_2 [m]	H_3 [m]	H_4 [m]	H_5 [m]	H_6 [m]	H_7 [m]	H_8 [m]	H_9 [m]
1	0.006	0.012	0.017	0.023	0.031	0.034	0.035	0.035	0.038
2	0.008	0.015	0.022	0.028	0.037	0.044	0.046	0.046	0.047
3	0.004	0.016	0.025	0.035	0.047	0.054	0.054	0.055	0.057
4	0.012	0.026	0.040	0.060	0.076	0.086	0.088	0.088	0.089



(a) 二値画像, (b) は波頂部と飛沫の分離後の画像（黒色が飛沫, 青色は波頂部）, (c)PIV の結果 (d) は PTV の結果

図-3. 画像解析後の一例

そこで、撮影画像から飛沫特性量を抽出する際に、画像上壁面の位置にある画素塊を飛沫として扱うこととすると図-3 の (a) は撮影画像を二値化して液体部を分離した結果を、(b) は飛沫と波頂部の分離結果の一例である。

3.2 画像解析手法

飛散している飛沫は高速度で変形しているため、安定した形状で撮影画像中に撮影されることは困難であり、それ故個々の飛沫特性の時間変化を把握することは困難であった。本研究では、一連の撮影画像から PTV 手法を用いて個々の飛沫を追従するアルゴリズムを開発した。まず、PIV によって飛沫群の移動速度を求めた。図-3 の (c) が PIV の結果の一例である。この時飛沫の分布情報は偏在しているため、速度情報は欠損している。欠損している情報を補間する方法として、小林 [5] の方法を用いた。

次に式(1)によって画素塊の重心位置を移動予測位

置 (X, Y) に移動させる。

$$(X, Y) = \sum_{i=n}^4 (u_i, v_i) / 4 + (x_g, y_g) \quad (1)$$

(x_g, y_g) : 重心位置, (u_i, v_i) : 画素塊を囲っている四方4点のPIVの移動距離の結果である。そこから、時刻 $T+1$ の画素塊の重心位置を以下の式(2)で探查させる。

$$((X, Y) - (x_{g_{t+1}}, y_{g_{t+1}}))^2 < (R)^2 \quad (2)$$

(X, Y) : 画素塊の移動位置予測, $(x_{g_{t+1}}, y_{g_{t+1}})$: 解析時刻 t の次時刻の重心位置, R : 探查領域の直径である。探查された画素塊の個数が一個の場合, 対応付ける。探查された画素塊の個数が二個以上の場合, 画素塊の面積の差, $|A_{g_t} - A_{g_{t+1}}|$ が最も小さい画素塊を対応付ける。 A_{g_t} : 解析時刻 t の画素の大きさ面積, $A_{g_{t+1}}$: 解析時刻 $t+1$ の画素塊の面積。図-3の(d)のように結果が算出される。

4 飛沫の基本特性

4.1 飛沫発生個数

鉛直壁に衝突した波峰から発生した飛沫は細分化しつつ、高速度で撮影画像から沖側へと飛散していく、そこで、図-4は飛沫の抽出方法のイメージ図であるが、 $x=460, y=1230$ に検査ラインを設け、これらの検査ラインを越えて発生原から飛び去っていく飛沫個数を把握した。図-5はその一例を示している。撮影画像中の飛沫は波が鉛直壁に作用し始める $t^*=t/T=0$ から除所に増加するが、 $t^*=0.05$ 以降に緩やかに減少する傾向を示している。一方、撮影画像外へと飛散していく飛沫個数は、 $t^*=0.035$ 付近から増え始め、画像中に存在する飛沫個数 N_i と画像外へと飛散した飛沫個数 N_o の和 $N_i + N_o$ は一直線へと近似していくことがわかる。図-6では $T=1.90s$ の総発生個数の経時変化を示したものであるが、いずれも同様の傾向を示していることがわかる。

4.2 飛沫径

図-7の(a)は飛沫径の平均値の時系列変化である。全てのcaseで飛沫の平均径は約2mmで時間変化はほとんどない。図-7の(b)は $t^*=0.03, 0.06, 0.09, 0.12, 0.15$ の平均粒径 $D=1mm \sim 10mm(+0.5mm)$ ごとの発生個数 N_D を総発生個数 N に占める割合である。 $D=1mm$ の飛沫が40%ほど占めており、粒径が大きくなるほど少なくなる。時間経過による粒径への影響は無い。

4.3 飛沫の飛散速度

図-8は飛沫の平均飛散速度及び、最大飛散速度の時系列変化である。図-8を見ると、 $t^*=0$ から平均飛散

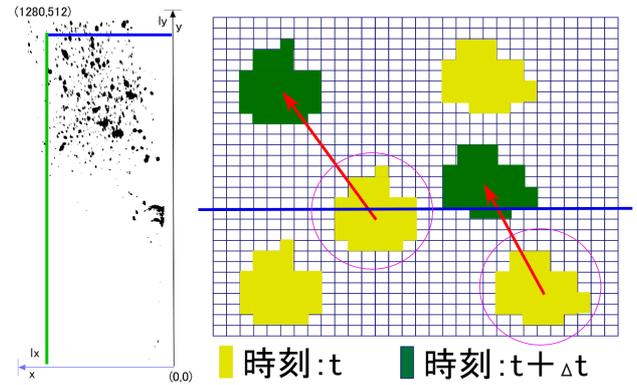


図-4. 飛沫個数の解析方法イメージ図

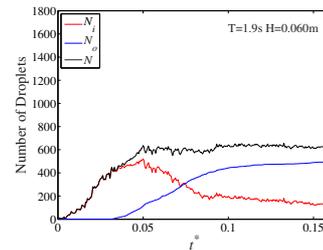


図-5. 飛沫個数の時系列変化 一例

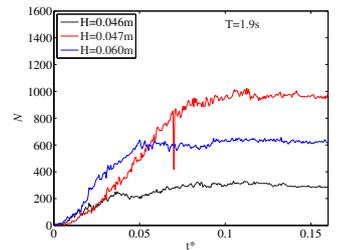
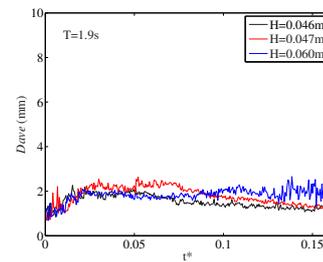
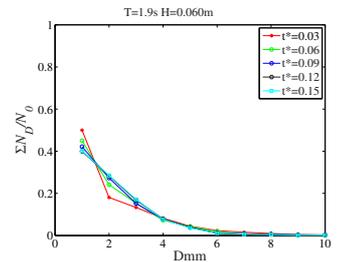


図-6. 飛沫個数の時系列変化



(a) 平均径の時系列変化



(b) 飛沫径分布

図-7. 飛沫径

速度は除所に増加して、 $t^* = 0.02 \sim 0.03$ で最大値をとり減少していくことがわかる。平均飛散速度のピークは約6m/sで、最大飛散速度は約10m/sである。図-9は $T=1.9s, H=0.06m$ のcaseの飛沫径ごとの平均飛散速度である。図-8と同様 $t^* = 0.02 \sim 0.03$ で最大値をとり約6m/sであることがわかる。すなわち、飛沫径の違いによる速度の差異は見られなかった。

4.4 飛沫の飛散方向

図-10は飛沫の平均飛散角度の時系列変化である。 θ は鉛直壁面に沿って上向きを 0° としている。図-10を見ると、 $t^*=0.01$ までばらつきが大きく、それ以降はおおよそ 20° である。時間が経つにつれて除所に角度が大きくなり、 $t^*=0.13$ から平均飛散角度が低下する。作用波浪の違いによる平均飛散角度の違いは見

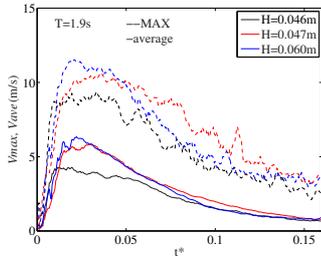


図-8. 飛散速度の
時系列変化

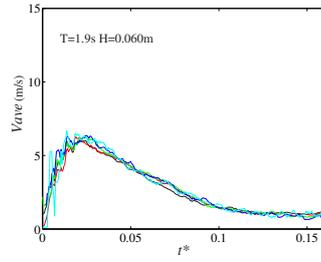


図-9. 飛沫径ごとの飛散
速度時系列変化

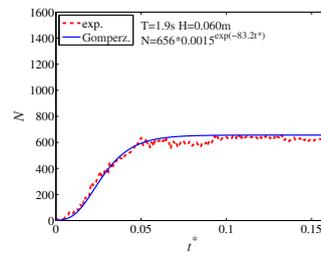


図-12. 飛沫個数の推定

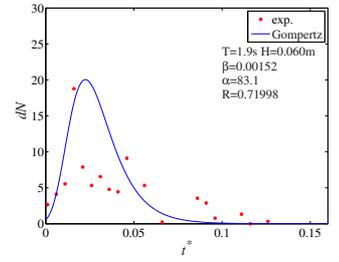


図-13. 発生個数

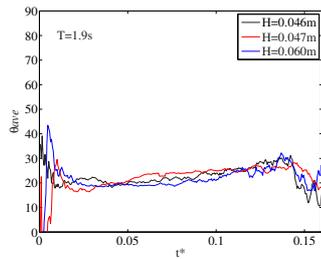


図-10. 飛散角度の
時系列変化

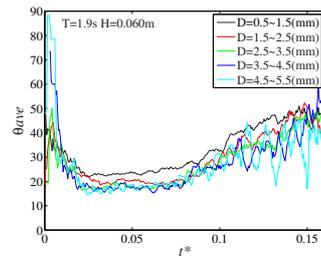


図-11. 飛沫径ごとの飛散
角度時系列変化

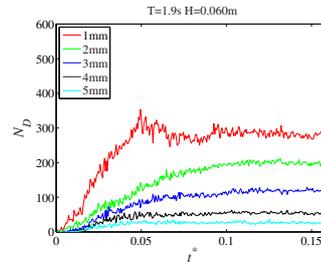


図-14. 飛沫径別の発生個数

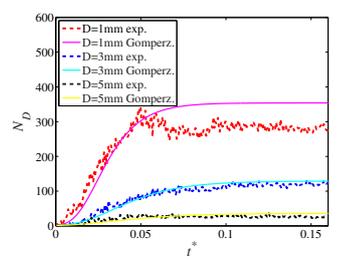


図-15. 飛沫個数の推定

られなかった．図-11 は $T=1.9s$, $H=0.06m$ の case で飛沫径ごとの平均飛散角度である．図-10 と同様飛沫発生当初は約 $15^\circ \sim 25^\circ$ であり，時間が経過するにつれて飛散角度は大きくなっていく．

5 飛沫特性のモデル化

港湾構造物への飛沫付着量を検討するためには，どのようなタイミングでどのような飛沫がどの程度の量を発生するのか把握することが重要である．そこで，得られた実験結果より上記のような飛沫の発生特性量のモデル化を試みた．

5.1 飛沫個数の推定

ゴンベルツ曲線は成人の死亡率を表現するものとして考案された傾向曲線であり，生物の個体数に比例した増殖がある一方で，年齢に依存した増殖率の減少を考慮した理論により導かれている．ゴンベルツ曲線は式(3)であらわされる．

$$N = N_0 \beta^{\exp(-\alpha t^*)} \quad (3)$$

N ：飛沫個数， N_0 ：実験値より求められた飛沫総数である．また， α , β は係数で，これらを最小二乗法によって求めた．図-12 は再現結果の一例を示しており，実験値との整合性は極めて良いことがわかる．ゴンベルツ曲線を微分すれば，単位時間当たりの飛沫発生個数を求めることができる．

$$dN = N_0 \beta^{\exp(-\alpha t^*)} (-\alpha) \log(\beta) \quad (4)$$

dN ：飛沫の発生個数である．図-13 は各時刻において式(4)で求められる飛沫発生数と実験によって求められたそれを比較したものである．両者の整合性は必ずしも良いとはいえないがこれは撮影画像中の飛沫がゆらめきや欠損することにより個数が変動するためであると考えられる．

5.2 飛沫径

図-14 は $D=0.5mm$ から $1mm$ 間隔で個数を集計したそれぞれの発生個数である．図-14 を見みると，図-12 と同じ s 字型の形状をしている．ゴンベルツ関数で飛沫径ごとの飛沫個数の推定を行った．図-15 は $D=1mm$, $3mm$, $5mm$ の飛沫個数時系列変化をゴンベルツ関数により推定した結果である．定性的に一致しているように思われる．

表-3 は図-15 の飛沫径ごとの飛沫個数の時系列変化をゴンベルツ関数により推定する際に最小二乗法によって決定した α , β と飛沫径 D との関係をまとめており．図-16 は表-3 から飛沫径 D と α , β の関係を式で表した． α は式(5)で表されるワイブル曲線の形状を用いた．

$$y = c_\alpha (x/a_\alpha)^{(b_\alpha - 1)} * \exp(-(x/a_\alpha)^{b_\alpha}) \quad (5)$$

ここに係数 a_α , b_α , c_α は係数で最小二乗法によって決定した．一方， β は対数を用いた式(6)で表した．

$$y = 1 - \exp(-a_\beta (x - b_\beta)) \quad (6)$$

a_β , b_β は係数で最小二乗法によって決定した． α は多少ばらつきはあるが，概ね再現できている． β は傾き

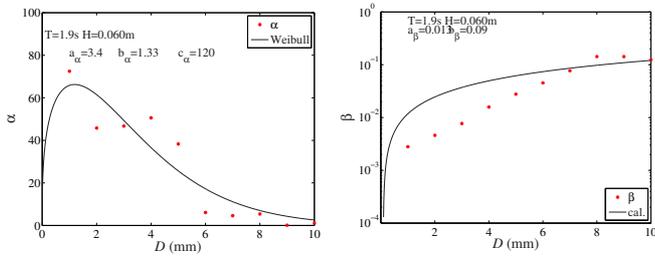


図-16. 飛沫径 D と α, β の関係

表-3. 飛沫径 D と α, β ($T=1.9s, H=0.060m$)

D(mm)	N_D	α	β
1	354	71.8	0.0028
2	213	46.2	0.0046
3	129	46.4	0.0077
4	63	52.1	0.0158
5	36	35.1	0.0277
6	22	6.3	0.0454
7	13	4.6	0.0769
8	7	5.7	0.1428
9	7	0.1	0.1428
10	8	1.2	0.125

が緩やかであるが、飛沫径が大きくなるほど、 β の値が大きくなるという傾向は表せている。

同じようにして求めた別の case の結果を示す。図-17, 図-18, 図-19 は $T=1.6s, H=0.056$ の飛沫総個数、飛沫径ごとの飛沫個数の時系列変化の推定結果、飛沫径 D と α, β の関係である。実験値との整合性は極めて良いことがわかる。

表-4 は計算条件である。実験から得られた N_D 、図-16 の (a) ワイブル関数で得られた α 、図-16 の (b) 対数関数で得られた β を使って実験の再現計算を行った結果が図-20 の (a) である。飛沫径 $D=1mm$ の結果は増加傾向は表せているが、実験値で最大となった後、減少している時刻は再現できていない。 $D=3mm, D=5mm$ では概ね再現できていると言える。図-20 の (b) は図-20 の (a) より N_D の計算結果を全て足し合わせる ($N = \sum N_D$) ことによって飛沫総個数の再現を行った。 $t^*=0.05$ まで良く再現できているが、 $t^*=0.05$ 以降実験結果と計算結果の差が広がっていく。

6 結論

● PTV を作成することによって、新たに飛沫の特性量である飛散方向、飛散速度が解析可能となった。飛散速度の最大値は約 12m/s であり、平均飛散速度は

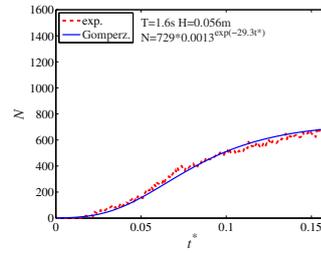


図-17. 飛沫総個数の推定

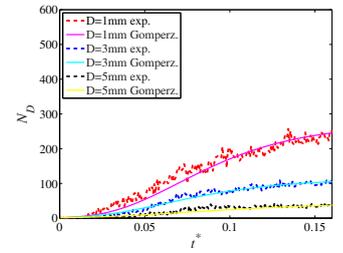


図-18. 飛沫径別の個数の推定

($T=1.6s, H=0.056m$)

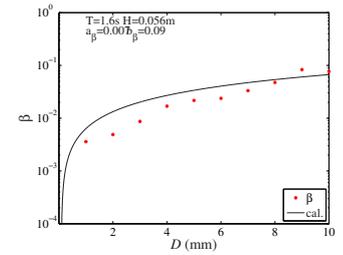
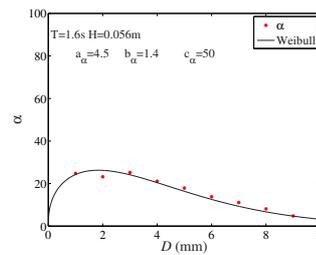


図-19. 飛沫径 D と α, β の関係
($T=1.6s, H=0.056m$)

表-4. 計算条件 ($T=1.9s, H=0.060m$)

D(mm)	N_D	α	β
1	354	65.8	0.0108
2	213	61.5	0.0245
3	129	49.4	0.0371
4	63	36.6	0.0496
5	36	25.7	0.0618
6	22	17.2	0.0740
7	13	11.2	0.0859
8	7	7.0	0.0977
9	7	4.3	0.1094
10	8	2.8	0.1209

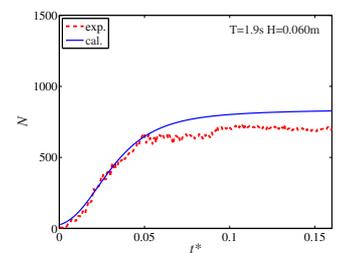
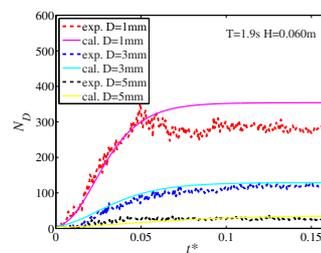


図-20. 飛沫個数の計算結果

6m/s である。飛沫径の大きさによる平均飛散速度に差異は無かった。平均飛散角度は約 20° である。飛

沫径の大きさによる平均飛散角度に差異は無かった。

- 検査ラインを設けることによって、飛沫の総個数が得られるようになった。

- 飛沫個数はゴンペルツ関数を用いることによって再現可能である。ゴンペルツ関数を微分することにより、時間の関数として飛沫の発生個数を表した。

- 飛沫径ごとの発生個数もゴンペルツ関数により推定できることわかった。ゴンペルツ関数で用いられる係数 α , β と飛沫径 D の関係はワイブル関数の形状、対数関数を用いることによって再現できることがわかった。

- ワイブル関数、対数関数から得た α , β を用いて飛沫個数の再現計算を行った結果、増加傾向は再現できた。

参 考 文 献

1. 石田 昭・花田昌彦・細井正延(1982): 飛沫の発生に関する実験的研究, 海岸工学講演会論文集, No. 29, pp385-388.
2. 武田将英・魚住健治・重松孝昌・津田宗男・羽瀧貴士・網野貴彦(2011): 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), No.2 pp.673-678
3. 武田将英・魚住健治・重松孝昌・津田宗男・羽瀧貴士・網野貴彦(2011): 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), 第 67 巻, No. 3, pp.701-705
4. 渡部 靖憲・石崎真一郎・新井田靖郎(2010): 越波ジェットの波峰方向不安定とフィンガージェットの形状遷移, 海岸工学論文集, No.1 pp.76-80
5. 小林敏雄(1982): 可視化技術と画像処理技術の円柱まわりの流れへの適用, 流れの可視化, Vol2.

討議

討議 [谷口徹郎 准教授]

PTV の略及び、PIV と PTV の違いを教えてください。また、PIV よりも PTV の方が精度は高いのか
回答

PIV の略は Partical Image Velocimetry, PTV の略は Partical Tracking Velocimetry. 両者は粒子画像から速度を求める手法であり、PIV は粒子群の分布パターンをもとに相関法を用いて任意地点での流速を求める方法で、PTV はトレーサ自体の移動距離を求める方法である。本研究では、PIV の流速結果は粒子の移動位置の予測、PTV で個々の粒子の流速結果を算出している。個々の粒子の運動を予測する上では PTV の方が向いている。しかし、PTV では個々の粒子を次時刻の粒子と対応付ける方法が課題とされているので精度が高いというわけではないと考えられる。

討議 [谷口徹郎 准教授]

図-3 の (c)PIV の解析結果、(d)PTV の解析結果のベクトルが同じ長さに見えないが PIV と PTV の刻み時間は違うのではないかと。PIV の刻み時間が小さいためにベクトルが大きいのではないかと
回答

PIV の解析を行う画像と PTV の解析を行う画像は同じ画像を用いているので、刻み時間は変わらない。PTV の解析を行う際に PIV の流速結果を用いて粒子の移動位置を予測し、その周囲を探索させる領域 R を最大 5mm としているので、最大 $\pm 5\text{m/s}$ の違いは生まれる。PIV の解析結果と PTV の解析結果を比較しても $\pm 5\text{m/s}$ を越える結果は見当たらなかった。

討議 [山口隆司 教授]

濡れ量だけで塩害の対策を評価しても良いものか
回答

コンクリート工学分野における既往の知見によると、Fick の拡散方程式に基づく劣化予測式を用いてコンクリート構造物の塩化物イオンの浸透深さを予測できる手法が考案されている。その劣化予測式は塩化物イオンの濡れ量を初期値として与えることによって劣化予測を行う式であるため、濡れ量を予測することで劣化予測対策を立てることが可能となる。

討議 [水谷聡 教授]

構造物への飛沫の濡れ量はどのようにして

行われるのか。

回答

本研究の最終目標は飛沫特性を考慮した二次元波浪モデルを作成することにより、現地海域の再現計算を行うことである。その時、飛沫の濡れ量はコンクリート構造物表面を分割することにより、その面積当たりの付着量として表現することを想定している。

討議 [重松孝昌 教授]

飛散角度について、図-10 の $H=0.060\text{m}$ の結果は図-11 を平均した結果だと考えられるが、両者の間に整合性があるようには見えないが図-11 に抽出された全ての飛沫径の結果が出ているのか
回答

図-10 は全飛沫径の平均飛散角度であり、図-11 は飛沫径 1mm ごとの平均飛散角度である。飛沫径は最大 10mm まで分類しているが、図-11 の結果は 5mm までの結果しか今回の発表では載せていないので、そもそも整合性は無い。