

鉛直壁前面に円柱が存在する場合における飛沫発生に及ぼす 波浪変形の影響に関する研究

A STUDY ON INFLUENCE OF WAVE DEFORMATION ON SPLASH GENERATION BETWEEN A VERTICAL CYLINDER AND VERTICAL WALL

河海工学分野 上川 岳人

River and Coastal Environmental Engineering Takehito KAMIKAWA

係留施設の一つである直杭式棧橋において、海水飛沫が床版下部のRC構造部に直接付着することによる、塩害劣化が報告されている。しかし、棧橋下部において発生する飛沫の発生条件やその発生メカニズムについてはほとんど明らかになっていない。そこで本研究では鉛直壁の前面に円柱を置いた場を用いて水理模型実験と数値解析を行った。まず、水理実験の結果、円柱を設置したことによって流動が変化し壁面付近とその前面で飛沫が発生した。そして、数値解析を行った結果、回折波が鉛直壁の前面で局所的に流速が集中し飛沫が発生することが明らかになった。

Soil salinity has been reported in pile piers, one of the mooring facilities, due to seawater splashes adhering directly to the RC structure bottom surface. However, the condition of splash generation occurring in the lower part of the pier and the mechanism of its occurrence are hardly elucidated. In this study, I conducted hydraulic model experiments and numerical analysis. As a result of a hydraulic model experiment, splash occurred near the wall and its front because of wave deformation by a cylinder. As a result of numerical analysis, it became clear that the diffused wave locally concentrates at the front of the vertical wall and splash occurs.

1 研究背景、目的

係留施設の一つに直杭式横棧橋がある。直杭式横棧橋は図-1のように岸壁の前面に、RC構造の床版と鋼管杭からなる構造物を設置したものである。この棧橋の上部工下部において、塩害による劣化被害が多数報告されている¹⁾²⁾。直杭式棧橋の塩害劣化が局所的であること、上部工が海水面よりも上にあること、塩害劣化は乾湿を繰り返すことによってより進行しやすくなることから、局所的に海水面から発生する飛沫が付着することによって塩害劣化が発生しているものと考えられる。そのため、海水面から発生する飛沫の発生要因や発生量を明らかにすることができれば、棧橋に付着する塩分量がわかり、

飛沫の発生を考慮した設計を行うことが可能になると考えられる。しかし、現地においては、棧橋上部工と海水面の間のクリアランスが小さいために現地の波浪観測が困難であるため、波と飛沫発生を関連性は不明である。既往研究では、武田らや渡部らが壁体に波を作用させたときに発生する飛沫に着目して研究を行っている。武田ら³⁾⁴⁾は、波浪条件から飛沫の発生条件や飛散量、飛散速度について考察を行なった。その結果鉛直壁に作用する波によって発生する飛沫の発生条件は水深波高比と相対水深の比によって分類することが可能であること、飛沫の総発生量はゴンペルツ曲線で表現することが可能であることが明らかになった。渡部ら⁵⁾は砕波を壁体に作用させた際に発生する飛沫の発生過程に着目し、高速度カメラを用いて砕波が壁体に衝突し、鉛直ジェット生成後の飛沫発生過程を明らかにした。しかし、渡部らや武田らの研究は鉛直壁に砕波を作用させたときに発生する飛沫について考察を行っている。直杭式棧橋は静穏な海域に建設されることが多く、砕波が塩害劣化の主要因になるほど棧橋に襲来するとは考えにくい。そのため、塩害劣化の原因となる飛沫の発生原因とは考えにくい。また、直杭式棧橋を構成する要素として鉛直杭があるが、鉛直杭を設置したことによって発生する波変形と飛沫発生を同時に考慮した研究は筆者が知る限りほとんどない。そこで、本研究では砕波が発生しないような波を対象とし、鉛直壁前面に直立円柱を設置した際に発生する

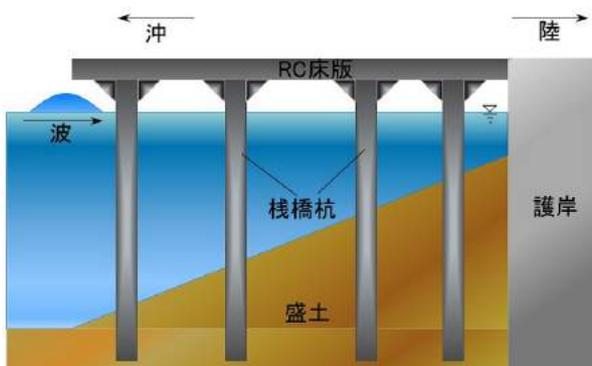


図-1 杭式棧橋の概略図

飛沫と波の変形の関係性について考察することを目的として研究を行う。

2 水理模型実験による飛沫発生条件の把握

2.1 実験条件

実験は、長さ 50m、幅 1m、高さ 1.5m の片面ガラス張り水槽を用いて行った。figbox に示すように、造波板から 33m 離れた位置に厚さ 12mm 耐水ベニヤ製の不透過壁を設置し、不透過壁前面に高さ 0.375m、幅 1.0m、長さ 0.7m、斜面勾配 1 : 2 で構成されるマウンド模型（耐水ベニヤ製）を設置した。マウンド上には、不透過壁からその中心までの距離 $l(=0.35\text{m}, 0.45\text{m})$ だけ離れた位置に直径 $D=0.11\text{m}$ の塩化ビニル製の円柱杭を設置した。水深はマウンド上で 0.250m、水平床上で 0.625m で一定とした。実験では碎波が発生しないような波浪条件を選択した。用いた規則波の諸元を表-1 に示す。沖波換算波高 H_w' は、造波機から 10m の位置に設置した 2 台の容量式波高計 (CH-601, CHT6(株)KENEK 製) を用いて 100Hz で収集した水位変動データを、ゼロアップクロス法を用いて個別波に分解し、波高が安定した後の 5 波分を抽出し、それらの波高の平均を入射波高とし、浅水係数で除すことで求めた。マウンド上の円柱杭の側方には容量式波高計と鉛直 2 次元電磁流速計 (ACM200, JFE アドバンテック (株) 製) を設置し、杭設置位置における水位変動と静水面下 0.05m における流速を計測した。水槽のガラス面の側方から波が円柱杭に作用する過程をビデオカメラ (HDR-XR520V, SONY 製) で撮影を行った。得られた画像から、発生の有無を判定した。なお撮影する期間は、微小振幅波理論から推測される波の伝播速度を用いて、不透過壁を反射した波が造波板で反射して再びマウンドに到達するまでの期間とした。

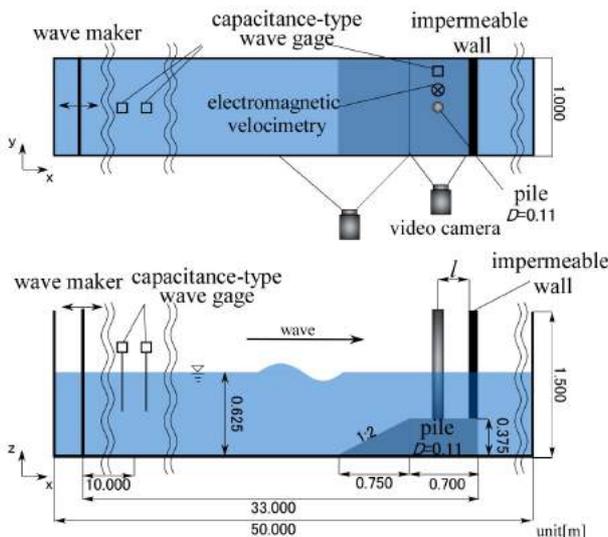


図-2 実験水槽 (上) 上面図 (下) 側面図

2.2 実験結果

本実験条件の下では、不透過壁面で飛沫が発生する場合と不透過壁と円柱杭との間で発生する場合の 2 通り

表-1 実験条件

h_0 [m]	l [m]	T [s]	L_0 [m]	L [m]	H_w' [m]	H_w'/L_0
0.25	0.35	0.8	1.00	0.93	0.029 ~ 0.047	0.029 ~ 0.047
		0.9	1.26	1.12	0.050 ~ 0.055	0.040 ~ 0.043
		1.0	1.54	1.3	0.053 ~ 0.076	0.035 ~ 0.050
		1.1	1.84	1.48	0.052 ~ 0.090	0.030 ~ 0.049
		1.2	2.14	1.66	0.056 ~ 0.099	0.026 ~ 0.049
	0.45	0.8	1.00	0.93	0.033 ~ 0.049	0.033 ~ 0.049
		0.9	1.26	1.12	0.043 ~ 0.062	0.034 ~ 0.049
		1.0	1.54	1.3	0.053 ~ 0.075	0.034 ~ 0.049
		1.1	1.84	1.48	0.058 ~ 0.089	0.031 ~ 0.047
		1.2	2.14	1.66	0.057 ~ 0.100	0.026 ~ 0.048

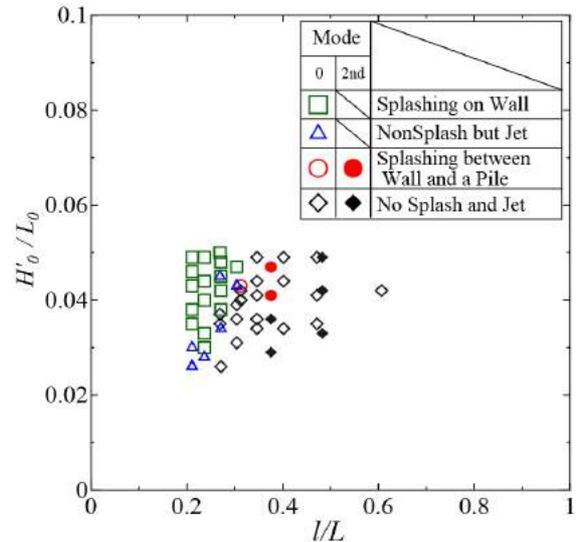


図-3 波浪条件で整理した場合

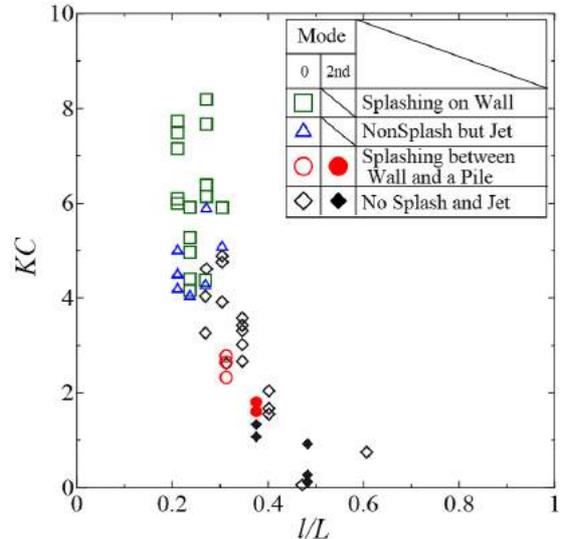


図-4 流速条件で整理した実験結果

に大別された (図-5, 図-6)。これらは円柱杭を設置せずに実験を行った場合は発生しなかった。そのため、円柱杭を置いたことによって発生したものと考えられる。いずれの場合も、碎波が衝突したときのような、爆発的に発生するのではなく、水面の一部が局所的に高くなるよ

うなジェットが形成され、ジェットの先端から飛沫が発生する場合であった。またジェットのみが形成され、飛沫が発生しない場合も観察された。また、ジェットの形成には、円柱杭を波が回り込む回折波と、不透過壁からの反射波、さらには、水槽横断方向に形成されるモード波が関与していると推察される。以下に、実験条件ごとにジェット及び飛沫の発生状況を示す。円柱杭と不透過壁間の距離 l が 0.35m の場合は (2) 両者の間でジェットの発生が見られた周期 ($T=0.8, 0.9s$), (3) 不透過壁面でジェットの発生が見られた周期 ($T=1.0, 1.1, 1.2s$) に分類された。(2) のジェットが発生する場合はさらに細かく分類され、 $T=0.8s$ の場合は、水路横断方向に二次モードの水面変動が発生し、回折波とモード波が重なり合うことによって飛沫が発生する様子が見られた。 $T=0.9s$ の場合は水槽横断方向のモード波は形成されず、不透過壁のごく近傍で回折波の重複によって、不透過壁に飛び出すようなジェットが形成され、先端から飛沫が発生した。 $l=0.45m$ の場合は鉛直壁面前面で発生する飛沫は確認されず、壁面で発生する飛沫のみが確認された。飛沫が発生する周期は $T = 1.1, 1.2s$ の時である。

波浪条件で分類した結果を図-3 に示す。波長に長いほど飛沫が壁面で発生する傾向が見られた。また、波高の増大とともにジェット、または飛沫の発生が確認された。ジェットの発生および飛沫の発生を KC 数と l/L の関係として整理した結果を図-4 に示す。図中の (2) は発生パターン (2) を、(3) は発生パターン (3) を表している。これらの図から、飛沫が発生するパターンは、 l/L が比較的小さく KC 数が比較的大きい条件であることがわかる。一方、 KC 数を見た場合は KC 数が 4 以上の場合で発生し始める傾向が見られた。一方、モード波が発生している場合は KC 数が約 2 でも発生する傾向が見られた。これは、 KC 数の増加とともに円柱を巻き込む水粒子が遠くまで輸送されるため、飛沫が壁面で発生したことが考えられる

$$KC = uT/D \quad (1)$$

u : 鉛直杭側面での流速 [m/s], T : 波の周期 [s], D : 杭径 [m]



図-5 壁面前面で飛沫が発生する場合



図-6 壁面で飛沫が発生する場合

3 数値解析による飛沫発生時の流動の再現

水理模型実験を行った結果、円柱を回り込む流れによって飛沫が壁面もしくは円柱と壁面の間で飛沫が発生することが推測された。しかし、円柱が存在することによって発生する回折波と飛沫発生との関連性について不明な箇所が多い。そこで数値計算を行い、飛沫発生に至るまでの流動を明らかにすることを目的として計算を行った。

3.1 波動場の精度検証

数値解析はオープンソースである OpenFOAM (Open source Field Operation And Manipulation) を用いた。OpenFOAM とは OpenCFD 社が開発した有限体積法ソルバ群であり、圧縮性流れや、二相流れ等様々な現象を解析することが可能である。本研究では OpenFOAM v-1806⁶⁾ を使用した。ソルバは等温二相流ソルバである interFoam に Roenby⁷⁾ らが開発した isoAdvector を導入した interIsoFoam を用いた。interIsoFoam の基礎方程式は表面張力を考慮した非圧縮ナビエ-ストークス式 (式 (3)) と連続の式 (式 (2)) である。ここで F は CSF モデル⁸⁾ を用いて表面張力を体積力に変換している。これを有限体積法を用いて空間的に離散化し PISO 法を用いて流速、圧力を求める。

計算条件について述べる。計算領域は $4.00 \times 1.00 \times 0.95$ [m] の領域に模型実験と同じ形状のマウンドと、壁面から 0.35m の位置に円柱を鉛直に設置した図-7。計算格子は OpenFOAM に標準搭載されている、blockMesh と snappyHexMesh を用いて分割した。分割後の計算格子を図-9 に記す。格子間隔最大の箇所で $\Delta = 2cm$ とし最小の箇所で $\Delta = 0.5cm$ とした。境界条件は入射境界部には造波境界を設定し、二次ストークス近似で算出される流速を境界値として計算を行った。また、反射境界部と円柱部には動的接触角を設定し、動的前進接触角は 114° 、動的後退接触角は 52° である。また、側方境界、底面境界は non-slip 条件とし。上空部分は開放条件とした。計算条件や物性値は表-2 に記す。

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \nabla \mathbf{U} = \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{U} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{F} = \sigma \mathbf{kn} \quad (4)$$

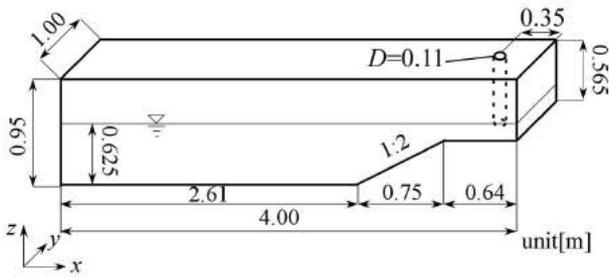


図-7 計算領域

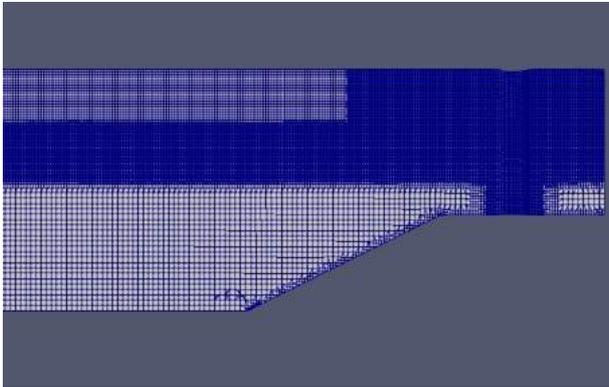


図-8 計算格子

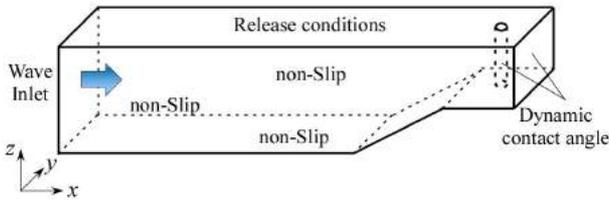


図-9 境界条件

σ :表面張力係数, k :界面の曲率, n :法線ベクトル

$$\rho = \alpha\rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2 \quad (5)$$

ρ_1 :気相の密度, ρ_2 :液相の密度

$$\mu = \alpha\mu_1 + (1 - \alpha)\mu_2 \quad (6)$$

μ_1 :気相の粘性度, μ_2 :液相の粘性度

造波水槽で実験した結果を用いて精度検証を行った。精度検証のケースは飛沫が発生しない場合2ケース (Case1, 2) と飛沫が発生しない場合1ケース (Case3) について検証を行った。造波条件は表-3に示す。計測器は回折波を再現できているのかを検証するために、円柱と鉛直壁の間に、電磁流速計と容量式波高計を三か所に設置し、それぞれ流速、水面変動を計測した。図-10 図-11に精度検証の結果を記す。精度検証の結果、おおむね水面変動や流速ピーク、位相を問題なく再現できており計算の精度は問題がないと判断した。

3.2 飛沫発生時の流動の再現

3.2.1 計算条件

飛沫発生時の再現検証を行った。飛沫発生現象再現のために行った再現計算は鉛直壁面手前で発生したパターン ($H = 0.054\text{m}, T = 0.9\text{s}$) と鉛直壁面上で発生したパ

表-2 計算条件

計算条件	計算時間間隔	自動刻み
	最大クーラン数	0.65
	乱流モデル	使用しない
	流速・圧力計算手法	PISO法
動粘性係数 ν [m^2/s]	水	1.004×10^{-6}
	空気	1.421×10^{-5}
密度 ρ [m^3/kg]	水	998.22
	空気	1.247
表面張力係数 σ [dyn/m]		0.07

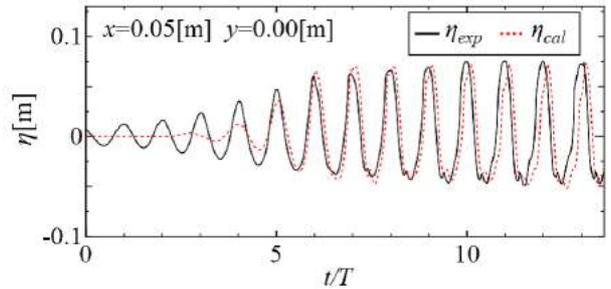


図-10 Case3の水面変動比較

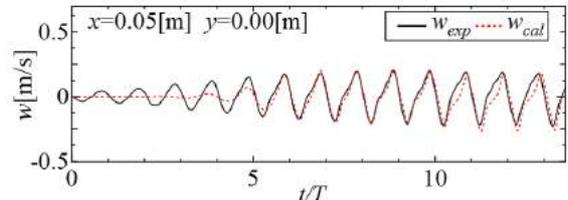
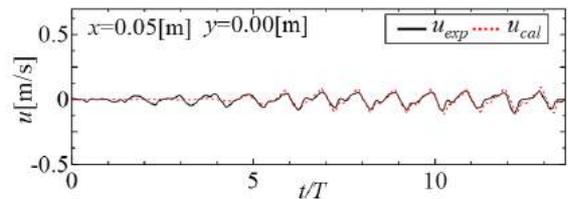


図-11 Case3の流速比較

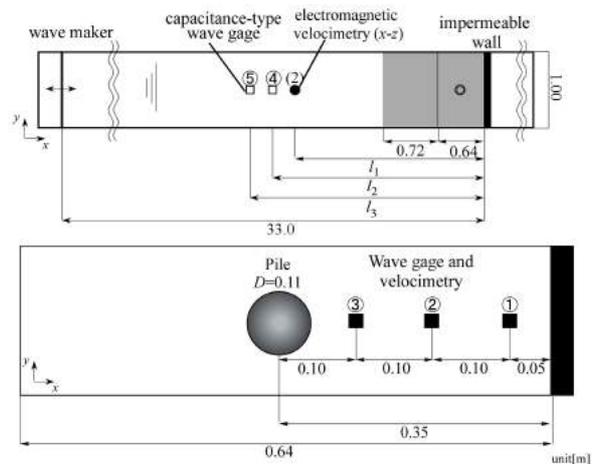


図-12 精度検証の実験図

ターン ($H = 0.060\text{m}, T = 1.1\text{s}$) の2パターンで計算を行った。ただし精度検証と同様の格子サイズだと飛沫が発生しなかったため、格子サイズを細かくすることとし

表-3 造波条件, 計測器設置位置

Case	H[m]	T[s]	L[m]	H/L	l ₁ [m]	l ₂ [m]	l ₃ [m]
1	0.040	0.9	1.26	0.032	2.96	3.19	3.50
2	0.050	1.0	1.54	0.032	2.89	3.12	3.50
3	0.060	1.1	1.83	0.032	2.74	3.20	3.59

た．しかし，その場合計算コストがかかり計算ができなくなるため格子サイズを飛沫が発生するポイントに絞り八分木メッシュを用いて細かくした．なお格子サイズは $\Delta = 0.025\text{m}$, $\Delta = 0.0125\text{m}$ とした．また，計算は途中で精度検証に用いた格子と同様の格子構成とし，マウンド上に波が到達し重複状態となってから一度計算を中断し，refineMesh 機能を用いて格子を再構築した．計算格子の範囲を図-13 に示す．なお計算の時間刻みやスキームの設定値は精度検証と同じである．また計算を開始した時間は，鉛直壁面手前で発生したパターンは $t = 11.3\text{[s]}(t/T = 12.56)$, 鉛直壁上で飛沫が発生するケースは $t = 9.4\text{[s]}(t/T = 8.55)$ とした．

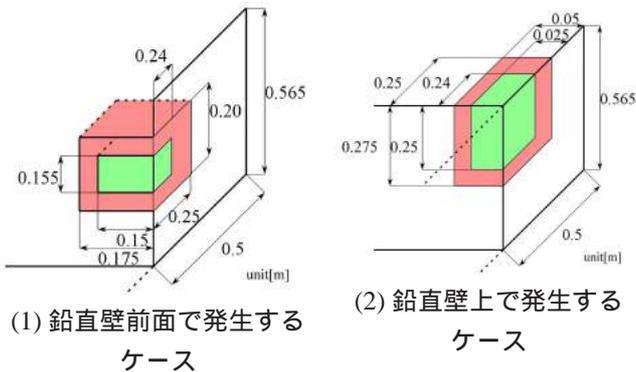
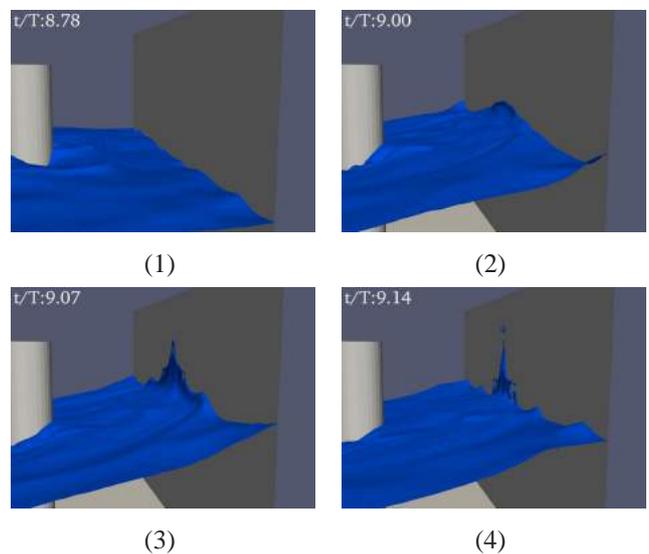
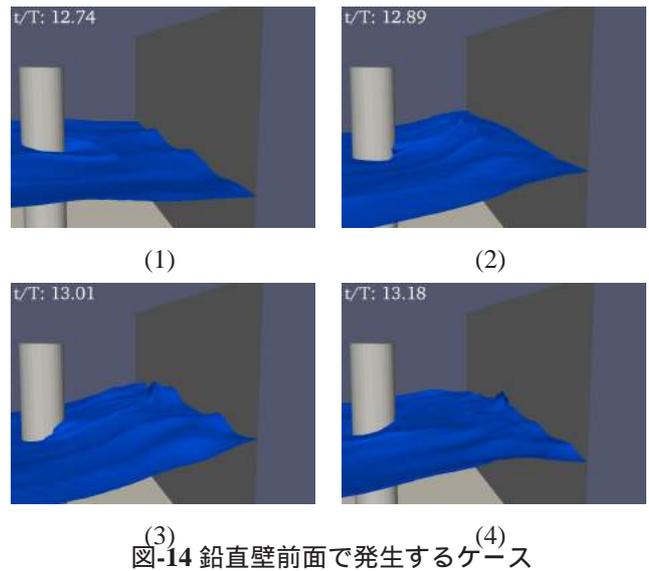


図-13 再構築した格子の範囲，(桃色： $\Delta = 0.025\text{mm}$ ，黄緑色： $\Delta = 0.0125\text{mm}$ ，)

3.2.2 計算結果

計算の結果のアニメーションと VOF 値が 0.5 を取る位置を水表面とした場合の水表面部の流動をそれぞれ示す．計算の結果，壁面の手前で発生するパターンでは飛沫は壁面の前面で飛沫発生元になる細く上向に伸びるジェットが 2 本観察された(図-14(3),(4))．鉛直壁上で発生する飛沫に関しては壁面上を遡上しながら鉛直上向に飛沫を発生させる様子が確認された(図-14(3),(4))．この時の水表面における xy 方向の流動を示したのが図-16 である．この図をみると，どちらのケースも波の進行方向以外に様々な方向に流速が生じていることがわかる．また，鉛直壁上において水面が谷の位置にあるときに円柱側面で y 方向に流速が発達していることがわかる(図-16，左)．円柱を回折した波は鉛直壁に向かって進行する波と放射状に広がる波が観察される．その後，ジェットが発生するケースは壁面に進行する回折波と $y = 0\text{m}$ に収斂



する流動が確認された．この収斂する波によって波が重なり合い， z 方向に大きな流れが発生し，ジェットが発生したと考えられる．一方壁面で発生する飛沫は鉛直壁前面で発生するケースよりもより壁に近い位置で収斂し始め，壁面に衝突し遡上していくことで局所的に飛沫が発生することが分かった．図-18 はジェット発生時に発生点と発生点から y 方向に 25cm, 45cm 移動した点における水平方向流速 u と鉛直方向流速 w の鉛直分布である．このグラフから，ジェット発生点以外では u, w ともに静水面よりも上側のみが大きな流速が見られる．一方ジェット発生点から離れた位置では流速が 0 に近い値を取ることがわかる．この原因としてジェット発生点ではジェットによって水表面にのみ大きな流速が観測されるが，その他の地点とジェット発生地点における水表面 10cm 以下においては回折波による影響はほとんど受けなくなり，重複波による流動が主になる．そのため，重複波のピー

クの位相であるため、流動はほとんど見られないためである。また、ジェットが発生したとき ($t/T = 13.03$) の最大水平流速を取ると、 0.38m/s であった。この地点における微小振幅波理論から算出される重複波の水粒子速度の水平方向最大値が $u_{theory} = 0.075\text{m/s}$ であることを考えると理論値の5倍程度の流速を持っていることわかる。また、鉛直壁面上で発生する飛沫に着目し同様に y 方向に 25cm 、 45cm における流速の鉛直分布を描いた。鉛直壁の前面で発生する飛沫と同様に水表面近くのみ大きな流速を示していた。うち上り速度は最大で 1.59m/s であり、鉛直壁前面で発生したジェットと比較して4倍近い値を示していた。壁面で遡上する場合も鉛直壁の前面で発生するジェットと同様に発生時 ($t/T = 8.95$) には x 、 z 方向流速が共に y 方向に変化させた場合よりも数倍大きな値を取ることがわかる。特に水平方向流速は 0.47m/s であり、鉛直方向流速も 0.86m/s であった。この位置における理論流速が $u_{theory} = 0.021\text{m}/sw_{theory} = 0.042\text{m/s}$ であるため、水平流速は理論値の約20倍、鉛直方向流速は理論値の2倍の値を持っており水表面に形成される回折波の収敛によって理論値よりも高い流速が発生し飛沫が発生したものと考えられる。

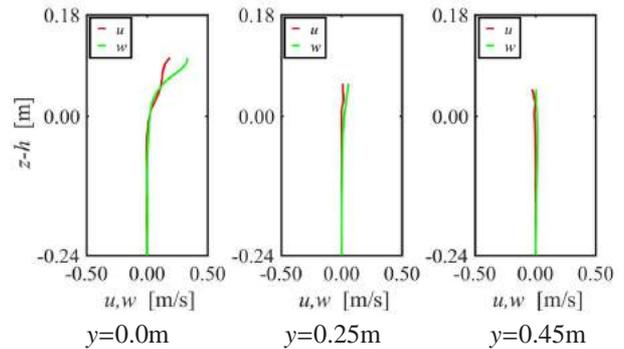


図-17 ジェット発生位置，発生時における流速の鉛直分布

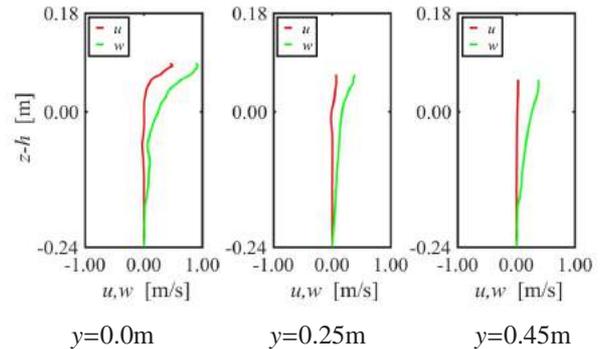
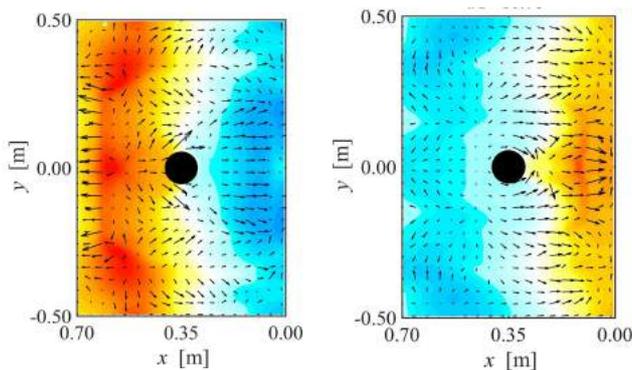
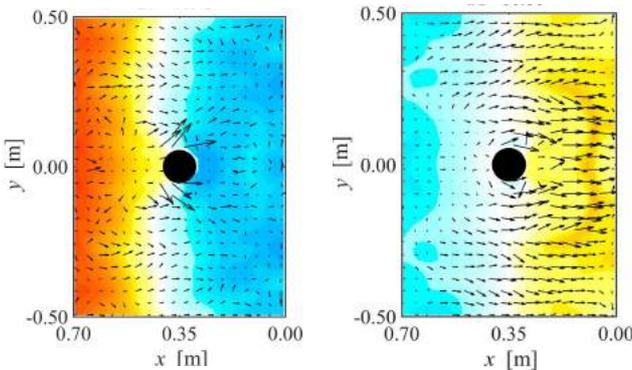


図-18 壁面衝突時の流速の鉛直分布



鉛直壁前面で発生するケース

(左) $t/T = 12.55$ ，(右) $t/T = 12.90$



鉛直壁上で発生するケース

(左) $t/T = 8.55$ ，(右) $t/T = 8.93$

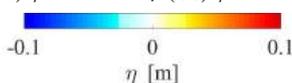


図-16 水表面における流速分布

4 結論

本稿における結論を以下に示す。

鉛直壁前面に円柱を設置した場合、鉛直壁上もしくは鉛直壁と円柱の間において飛沫が発生した。この飛沫は円柱を回折する波によって発生する飛沫、もしくは水路横断方向に大きく二次モード波が発達することによって発生したものであると考えられる。特に鉛直壁において発生する飛沫は KC 数が 4.0 以上の場合に発生する傾向が見られた。また、数値解析を行い、実験の再現を試みた。その結果、鉛直壁の前面で発生するジェットを再現することができた。また、鉛直壁上で発生する飛沫に関しては飛沫の発生まで再現することができた。そして、飛沫発生の原因は円柱を回り込む際に水表面で形成される回折波であり、回折波が鉛直壁の前面で収敛していくことによって局所的に飛沫が発生することが明らかになった。

参考文献

- 1) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 棧橋コンクリート上部工劣化実態概略調査報告, 港湾技研資料, No.617, June, 1988.
- 2) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 棧橋コンクリート上部工劣化実態詳細調査報告, 港湾技研資料, No.627, Sept, 1988.
- 3) 武田将英, 安平悠紀, 重松孝昌, 津田宗男, 羽瀨貴士, 網野貴彦: 構造物に作用する波浪による飛沫の発生限界に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.1.853-1.858, 2015.
- 4) 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.
- 5) 渡部靖憲, 石崎真一郎, 新井田靖郎: 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.76-80, 2010.
- 6) OpenFOAM ホームページ: <https://www.openfoam.com/>
- 7) Johan Roenby, Henrik Bredmose, Hrvoje Jasak: A computational method for sharp interface advection, Royal Society open science, Vol.3, No.11, 25p, 2016.
- 8) Brackbill, Jeremiah U and Kothe, Douglas B and Zemach, Charles: A continuum method for modeling surface tension, Journal of computational physics, Vol.100, No.2, pp.335-354, 1992.