

ジェット着水後の水面 - 渦相互作用

Surface-Vortex Interactions under Impacting Jets

北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科

○学生員 猿渡亜由未 (Ayumi Saruwatari)
正 員 渡部 靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

砕波帯内の乱流場の大部分は砕波ジェットの着水に伴い着水点で生成される大規模渦に起因して形成されるため、砕波水面は内部の流れ場にとって渦のソースとしての役割を果たす。ジェット着水に伴う強歪場は水面渦度を起源として斜降渦に代表される三次元渦度場の形成を誘発するが、これにより砕波ジェット着水の影響が底面近傍にまで急速に到達する(Watanabe et al. 2005)。また、砕波水面近傍では砕波ジェット先端の高曲率部における大量の飛沫の生成やジェット着水に伴う流体内部への気泡の混入など、気液界面の変形による現象が砕波過程を特徴付けている。これら気泡・飛沫の分裂スケールもまた、水面直下に形成される三次元渦度場の変動スケールにより規定されている。これらのことから、砕波帯内部の流れ場を正しく再現するためには、ジェット着水時の水面 - 渦相互作用を経由した水面直下の三次元渦構造の発生・発達過程を正しく評価しなければならない。

ジェット着水に伴う水面 - 渦相互作用は二次ジェット背後の水面に現れる縦渦, scar として観察することができる(Sarpkaya 1996, Brocchini & Peregrine 2001)。Scar は局所的に水面の曲率を増大させるため、その近傍で水面圧力境界条件が著しく変化し、内部の流体運動に影響を与えることが予想される。また、自由水面においてゼロ接線方向せん断力条件が満足されるとき、曲率を有する水面にはその曲率に応じた水面渦度が発生しなければならないため(Longuet-Higgins 1992), scar 直下に更なる二次渦が発生するなどして渦度場は発達していく。

本研究は、砕波ジェット着水と同時に水面で形成される三次元渦度場の再現のための基礎研究として、水塊ジェットの着水に起因する三次元渦度場と水面との相互作用について特徴化するものである。

2. 数値計算法

流体内部の流れ場の計算には Watanabe et al. (2005) と同様の Large Eddy Simulation を用いた。すなわち、非圧縮性流体を仮定し、フィルタリングされた Navier-Stokes 式の線形項を予測子修正子法と二段階分離解法により、非線形項を CIP 法により解いた。Navier-Stokes 式の線形成分の発散を取ることにより得られる圧力に関する Poisson 方程式は、irregular-star 法ベースの multi-grid 法により解いた。全ての変数は角柱ジェット幅 D 、着水速度 V 、流体密度 ρ_0 で無次元化された。

水面位置および曲率等の水面形状は Level-set 法により捕捉した。その際、計算セルから水面までの距離を表す Level-set 関数を距離関数として維持することが、水面形状

の正確な把握のために不可欠である。本研究では Sussman & Fatemi (1999) と同様の方法を用いて各 timestep 毎に水面近傍の Level-set 関数の再初期化を行った。

2.1 自由水面境界条件

自由水面では次式で示されるジャンプ条件が成立する。

$$m\left(\frac{\partial u_n}{\partial t_i} + \frac{\partial u_{t_i}}{\partial n}\right) = 0, \quad (1)$$

$$p = 2m \frac{\partial u_n}{\partial n} + 2s\kappa. \quad (2)$$

ここで、 μ は粘性係数、 t_i, n はそれぞれ水面の接線および法線方向、 u_i は i 方向水面流速、 σ は表面張力係数、 κ は水面の曲率である。これらはそれぞれ自由水面におけるゼロ接線方向応力条件((1)式)と圧力のジャンプ条件((2)式)を表す。水面渦度および scar 直下の流れ場を正しく再現するためには、これらの条件を正しく満足させなければならない。そこで本研究では高精度で自由水面境界条件を満足させ得ることが確認されている渡部・猿渡 (2006) と同一の方法で水面境界条件を設定し、ジェット着水点で発生する渦と自由水面との相互作用により発達する渦度場を再現した。

2.3 計算条件

ジェット着水後の強せん断力場により誘発される三次元渦度場の形成について特徴化するために、角柱形状水塊ジェットの静水面着水後の流れ場を解いた。図-1に示すような計算領域内に角柱ジェット着水点前面に原点を持つ直

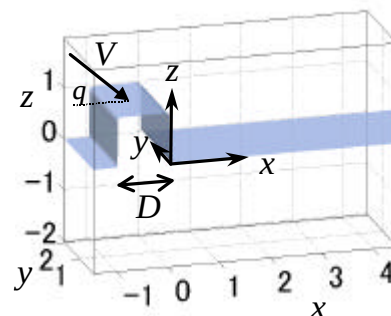


図-1 角柱形水塊ジェット

表-1 計算条件

Case	着水速度 V	ジェット幅 D	着水角 θ	We ($\times 10^3$)	Fr	水深 h	計算グリッド幅 dx
1	1.0 [m/s]	0.1 [m]	$\pi/6$	0.2	1.01	0.2 [m]	6.67 [mm]
2				1.4			
3				10.1			

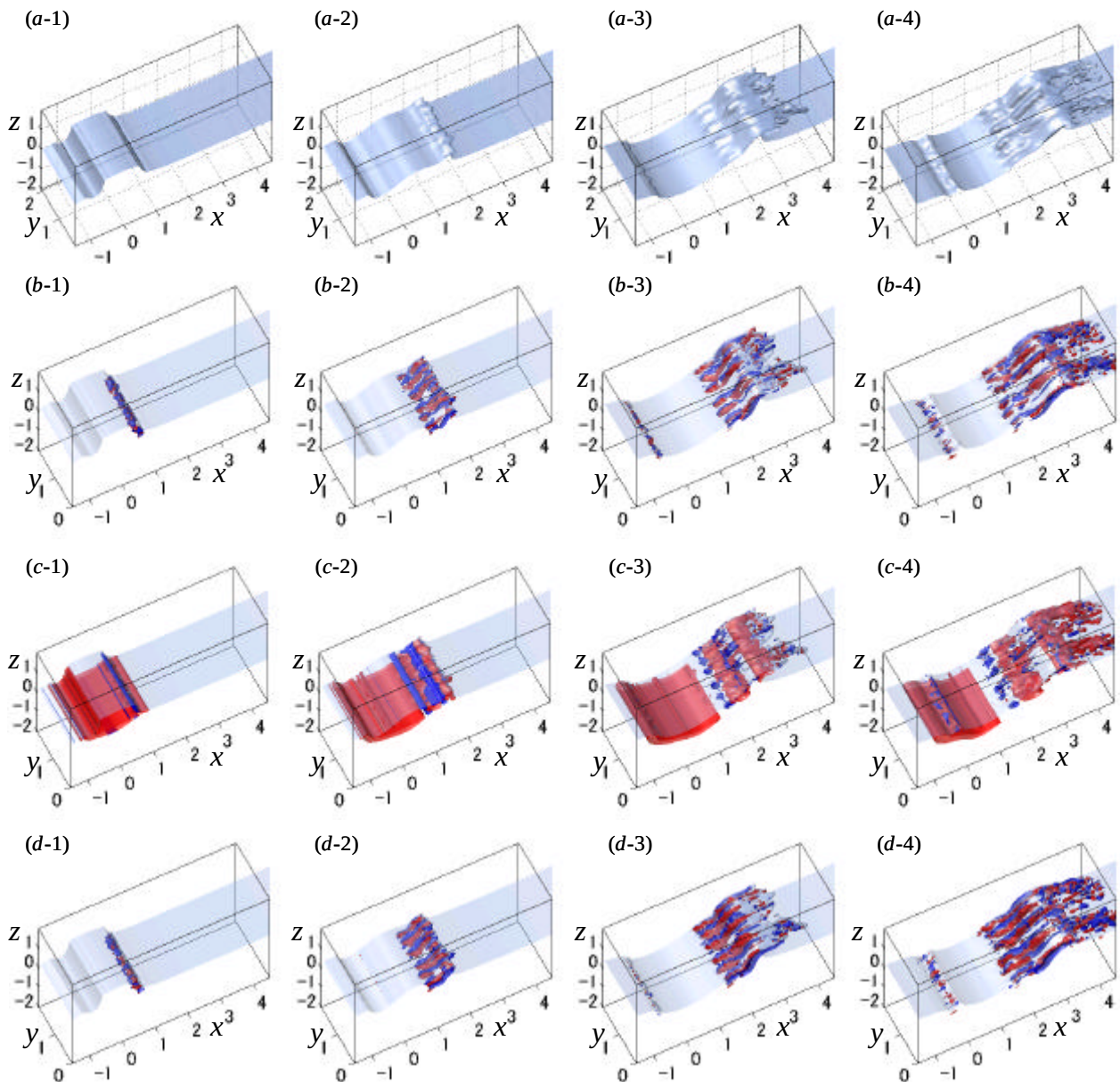


図-2 角柱ジェット着水後の水面形(a), x 方向渦度(b), y 方向渦度(c), および z 方向渦度(d)の時間変化(渦度レンジ: ± 0.5). (1) $tV/D = 0.5$, (2) $tV/D = 1.0$, (3) $tV/D = 2.0$, (4) $tV/D = 3.0$.
(Case 2: $V = 1.0$ [m/s], $D = 0.1$ [m], $\theta = \pi/6$, $We = 1.4 \times 10^3$, $Fr = 1.01$)

交座標系をとり、着水した瞬間の時刻をゼロとした。側壁には周期境界条件、底面にはnon-slip条件を設定した。

表-1に示される3つのケースについて計算を行った。いずれのケースもジェット幅を0.1 [m]、着水速度を1.0 [m/s]、水深を0.2 [m]とした。表面張力係数を水と同程度に設定したcase 2の計算結果から、ジェット着水後に現れる典型的な三次元流れ場を再現し、発生・発達過程について考察する。次に、初期の水面渦の形成および小スケールで変動する水面直下の流れ場に対して表面張力が与える影響を見るために、Weber数を $We = 0.2 \times 10^3$, 1.4×10^3 , 10.1×10^3 (それぞれ表面張力係数 $\sigma = 0.5, 0.0742, 0.01$ [N/m])と変化した流体に関して計算を行い結果を比較した。

3 計算結果

3.1 Scar形成過程

図-2はcase2により得られた水面形(a)と渦度(b, c, d)を表す。水塊ジェット着水直後から、着水点前面において x, z 軸成分の渦度が発生し三次元渦度場が形成される(無次元時間 $tV/D = 0.5$)。その後角柱ジェット前面から発生する二次ジェット背後において、ジェット進行方向に伸張強化された渦対が典型的なrib構造を形成すると共に、渦対と同スケールの水面変動(scar)が引き起こされた。また、二次ジェット先端で発達した三次元渦度場は水面を分裂させ飛沫を生成した(a-3)。

3.2 水面 - 渦相互作用

水面 - 渦相互作用による水面直下三次元渦度場の発達過程について考察するために、水面および渦度のスパン方向

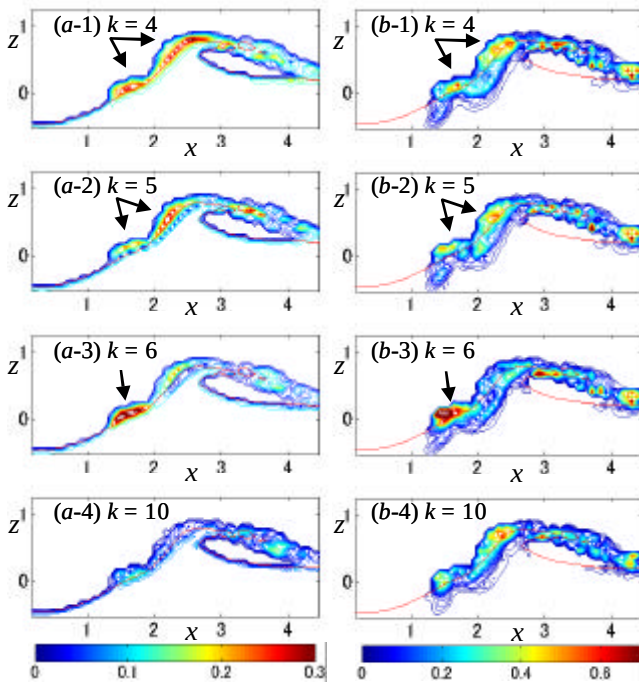


図-3 時刻 $tV/D = 2.5$ における水面(a)および x 方向渦度(b)の方向変動波数ごとのエネルギースペクトルのコンター図。

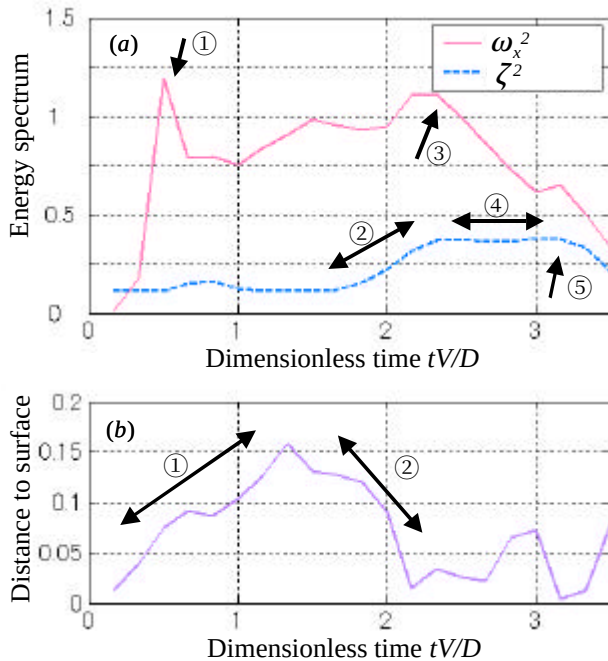


図-4 (a) x 方向渦度(実線)および水面(破線)の変動波数 $k = 6$ のエネルギースペクトルの時間変化。
(b) 変動波数 $k = 6$ の scar 後方渦から水面までの距離。

の変動について高速フーリエ変換(FFT)によるスペクトル解析を行った。図-3はジェット背後に明確な scar が形成されている時刻 $tV/D = 2.5$ における水面(a)および x 方向渦度(b)の各変動波数成分ごとのエネルギースペクトルの分布をコンター図で表したものである。Scar 水面で卓越する変動波数はその前方と後方とで異なり、後方で $k = 4 \sim 5$ 、前方で $k = 6$ 程度となった(k : FFT により求められた方向の計算領域幅に対する変動波数)。 $k = 4 \sim 6$ の波数域では、そ

れぞれの変動波数成分ごとのエネルギースペクトル極大値出現位置が水面と渦度とで一致した(図-3 矢印)。これは水面直下に形成された渦度場がそれと同スケールの水面変動を誘発したことを示唆する。 $k = 10$ については表面張力効果による水面応答の減少が見られる(3.3 節)。

図-4(a)はそれぞれ、渦の移流速度で追跡した scar 後方の縦渦の中心における x 方向渦度の卓越波数成分($k = 6$)のエネルギースペクトルとその直上の水面変動の同波数成分のエネルギースペクトルの時間変化であり、図-4(b)は渦の中心から水面までの距離の時間変化を表す。角柱ジェット着水直後の三次元渦度場の発生に伴い x 方向渦度が急速に発達する((a)①)。無次元時間 $tV/D = 1.7 \sim 2.3$ の間に水面変動の増加が見られるが((a)②)、これは水面が縦渦に巻き込まれることにより scar が形成されていることを示す。一方角柱ジェット着水と同時に水面で発生した縦渦は、ジェット突入時の運動量により一旦は流体内部へと導入されるが((b)①)、その後 scar が形成される頃には渦-水面間の距離が減少している((b)②)。これは水面下で対を形成した縦渦が、scar 形成時には自己誘導により水面直下にまで浮上してきていることを示す。その後 $tV/D = 2.3$ 以降、縦渦が減衰始めると((a)③)水面の変動エネルギースペクトルは一定値を取り((a)④)、 $tV/D = 3.3$ 程度から徐々に減衰し始める((a)⑤)。このように、水面はその直下の渦と同スケールで変動するが、渦の発達や減衰に水面が応答するまでにはタイムラグが発生する(変動波数 $k = 6$ の変動に対して無次元時間で 1.1 程度)。

3.3 表面張力効果

Scar が発生した水面では表面張力が復元力として働くことにより波動性が発生する。その時の水面の最小変動波長 λ_m は次式のように流体の表面張力係数により決定される。

$$\lambda_m = 2p \sqrt{\frac{s}{rg}}, \quad (3)$$

上式で求められる最小波長以下の水面変動は表面張力効果により発生しない。(3)式によると、表面張力係数を変化させた case 1, 2, 3 に対応する最小水面波長はそれぞれ $\lambda_m = 4.5, 1.7, 0.63$ [cm] となる。すなわちそれぞれのケースにおける最大変動波数は $k_{max} = 4.5, 11.7, 31.8$ となり、それ以上の変動波数を有する渦に水面は応答することができない。

図-5 は case 1 ~ 3 の計算結果から得られた水面(a)および x 方向渦度(b)の Fourier 変換された変動波数ごとの全計算領域内での最大エネルギースペクトルの時間変化である。ジェット着水から $tV/D = 0.5$ 後、様々な波数成分を持つ三次元渦度場が一斉に発生する((b)①)。三次元渦度場が形成されてから間もなく、表面張力による減衰効果を受けにくい変動波数の小さい成分から順に水面変動のエネルギースペクトルが増加していく((a)①)。ここで、case 1 では $k = 5$ 、case 2 では $k = 8$ 程度以上の変動波数成分の発達が微弱であった((a)②③)。これは、それぞれの表面張力係数に応じた最大変動波数 k_{max} に近づくにつれ、水面直下の渦に対する水面の応答が鈍くなっているためであると考えられる(図-3(a, b-4)も同様)。なお、case 3 については最大水面変動波数 k_{max} が本計算における方向の最大解

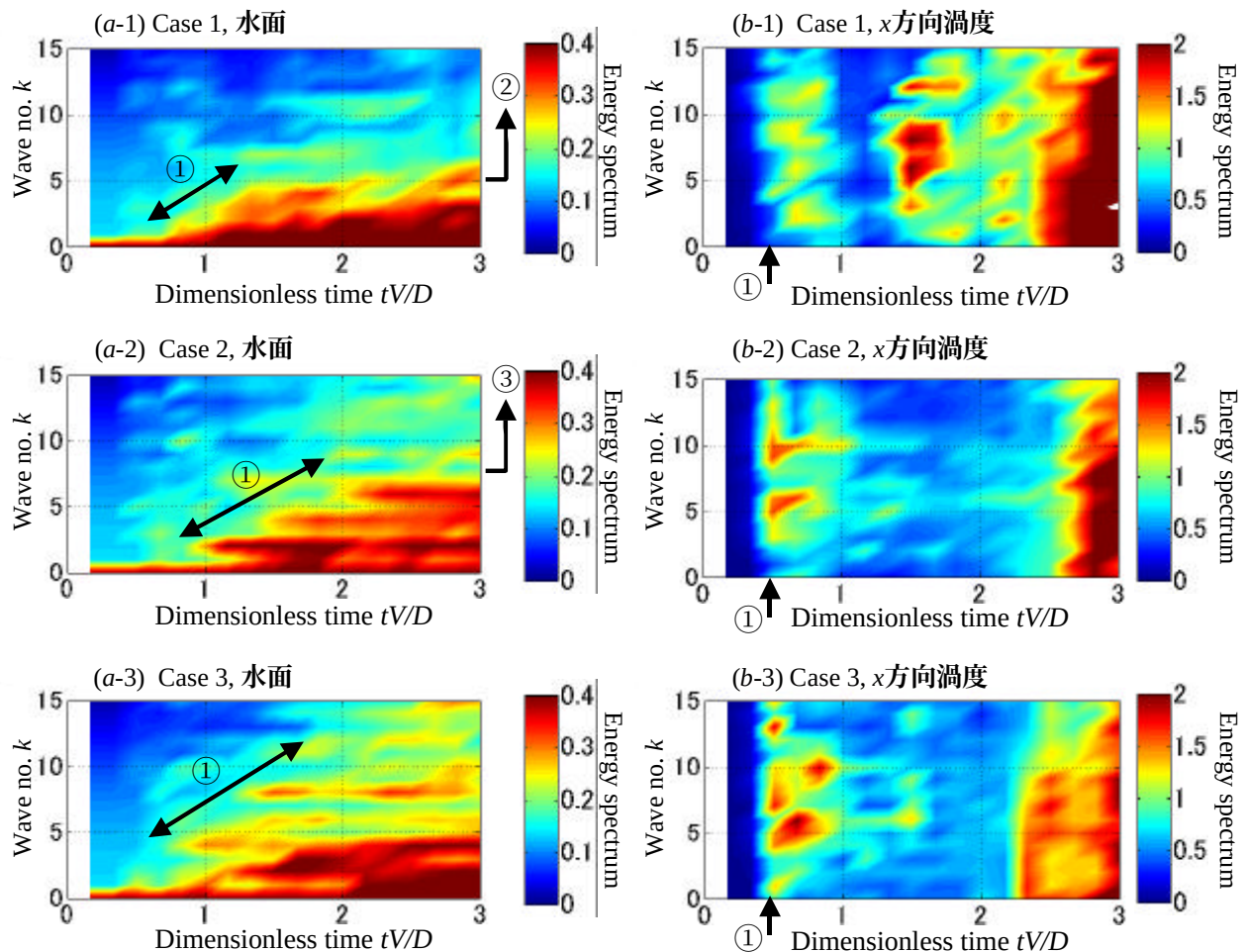


図-5 水面(a)および x 方向渦度(b)のspan方向変動波数ごとの最大エネルギースペクトルの時間変化。

- (1) case 1: $We = 0.2 \times 10^3$, $\sigma = 0.5$ [N/m], $k_{max} = 4.5$, (2) case 2: $We = 1.4 \times 10^3$, $\sigma = 0.0742$ [N/m], $k_{max} = 11.7$,
 (3) case 3: $We = 10.1 \times 10^3$, $\sigma = 0.01$ [N/m], $k_{max} = 31.8$.

像可能波数である $k = 15$ よりも大きいため、水面を解像しきれていない。

4. 結論

自由水面境界条件を適切に満足させることにより水面-渦相互作用を再現可能とし、碎波ジェットモデルである水塊ジェットが静水面に斜め方向に着水した後の流れ場の計算を行った。モデルジェット着水点で発生する三次元交代渦度場の二次ジェット内での発達過程および水面下の渦と同スケールの水面変動による scar および飛沫の生成を再現した。

計算により求めた流れ場における水面と水面直下の渦度場のspan方向の変動についてスペクトル解析を行い、変動波数ごとの発達過程を比較した。その結果、水面直下に形成された縦渦は、それと同スケールの水面変動を誘発することが確認された。また、水面が水面直下の渦度場に応答するまでにはタイムラグが存在することが示された。

表面張力係数の異なる3つの流れ場の計算を行い、水面の変動スケールを比較した。表面張力係数により決定される水面の最小変動スケールに近いそれ以下の渦度の変動

に対しては水面の応答が鈍化することが確認された。

参考文献

- 1) Brocchini, M. & D. H. Peregrine, 2001. "The Dynamics of Strong Turbulence at Free Surfaces. Part 1. Description". *J. Fluid Mech.* **449**, pp. 225-254.
- 2) Longuet-Higgins, M. S., 1992. "Capillary Rollers and Bores". *J. Fluid Mech.* **240**, pp. 658-679.
- 3) Sarpkaya, T., 1996. "Vorticity, Free-Surface, and Surfactants". *Ann. Rev. Fluid Mech.* **28**, pp. 88-128.
- 4) Sussman, M., E. Fatemi, 1999. "An Efficient, Interface-Preserving Level Set Redistancing Algorithm and Its Application to Interfacial Incompressible Fluid Flow" *J. Scientific Computing.* **20**, No. 4, pp. 1165-1191.
- 5) Watanabe, Y., H. Saeki, R. J. Hosking, 2005. "Three-Dimensional Vortex Structures under Breaking Waves". *J. Fluid Mech.* **545**, pp. 291-328.
- 6) 渡部靖憲, 猿渡亜由未, 2006. "ジェット着水過程における局所自由水面及び渦のダイナミクス", 海岸工学論文集, **53**, pp. 71-75.