砕波波峰方向流速の時空間変動と渦スケールの特徴化

Characteristics of spanwise velocity distributions and vortex scales in breaking waves

大塚淳一¹·渡部靖憲²

Junichi OTSUKA and Yasunori WATANABE

Three dimensional vortex structures involving pairs of longitudinal vortices are produced in breaking waves. Distributions of lateral velocities induced by the vortices were experimentally measured in small- and large-scale wave flumes using an Ultrasonic Velocity Profiler with the aim to identify the scaling law to describe the length, temporal and velocity scales of the longitudinal vortices. The rates of diffusion and surface replacement owing to the vortices were characterized for spilling and plunging breakers. It was also found fundamental features of local lateral flows with diffusion in the surf zone were subjected to Froude scaling law.

1. はじめに

砕波帯で生成・発達する渦は底質の浮遊・拡散、気中 から水中への気体輸送など沿岸域における多様な物質の 輸送・拡散過程に深く関与することが指摘されている (例えば, Nadaokaら, 1989;角野ら, 1995). しかしな がら, 砕波帯では砕波の発達に伴い時間的・空間的に渦 構造が大きく変化するためその構造を捉えることが難し く、物質の輸送・拡散過程を特徴付ける渦の長さ、時間 および速度スケールを定量的に計測した研究例は極めて 少ない.一方,著者ら(2006)は超音波放射軸上の瞬時 流速プロファイルを計測可能なUltrasonic Velocity Profiler (UVP) による砕波帯の波峰方向流速分布の計 測を行い,取得した流速分布に対する Wavelet 波数解析 結果から波峰方向に配列する渦構造(交互交代渦)の存 在およびその時空間遷移を明らかにしている. 交互交代 渦は砕波ジェット着水後に岸沖方向に広く分布し,波浪 の進行に伴い底面方向へ伸張する斜行渦へと発達するこ とがWatanabeら (2005) が行った三次元数値計算によ って説明されており、砕波帯ではこの交互交代渦が物質 の輸送・拡散過程に関わる重要な渦構造であると考えら れる.

本研究では,著者ら(2006)が行った実験と同様に UVPを用いた碎波帯における波峰方向流速分布の計測を 行い,交互交代渦が計測軸上を通過する際に現れる正負 の流速変動(図-1)の時間変化から渦の長さ,時間およ び速度スケールの時空間遷移を明らかにするとともに, 得られた渦の各スケールに関する情報をもとに物質の輸 送・拡散過程について議論する.

1	正会員	博(工)	(独法) 土木研究所 寒地土木研究所
	7 4 8		寒冷沿岸域チーム
2	止会員	博(上)	北海道大学准教授大学院上学研究科



図-1 波峰方向に配列する交互交代渦がUVPの計測軸上を通 過する際に現れる正負の流速変動



2. 実験方法と実験条件

実験は全長8.00m,幅0.25m,高さ0.60mの可変勾配型 小規模二次元造波水路(図-2)および全長24.0m,幅 0.60m,高さ1.00m,水路勾配1/20の中規模二次元造波水 路で行われた.座標系は砕波点の静水面から波の進行方 向をx軸,側壁の一端から水路横断方向をy軸,静水面か ら鉛直方向をz軸と定義した.表-1は実験条件を示して おり,Case1~Case7は小規模水路,Case8は中規模水路 で実験を行った.各ケースの砕波形式はCase1~Case3が 巻き波砕波,Case4~Case6では崩れ波砕波,Case7~

実験 ケース	T (s)	H _b (cm)	h _b (cm)	H _m (cm)	h _m (cm)	<i>x/</i> h _m	勾配 一	水路 規模	砕波 形式
Case1	2.0	13.8	13.3	7.2	8.6	5.3	1/15	小	Р
Case2	2.0	7.9	9.2	4.7	6.0	5.3	1/15	小	Р
Case3	2.0	5.2	5.6	3.6	3.6	5.3	1/15	小	Р
Case4	1.2	13.8	15.7	8.3	11.7	5.1	1/20	小	S
Case5	1.2	12.0	11.3	7.1	8.4	5.1	1/20	小	S
Case6	1.2	5.5	5.8	3.4	4.3	5.1	1/20	小	S
	1.4	13.6	17.5	9.5	15.5	2.6	1/20	小	S-P
Case7				7.4	14.0	5.0			
				3.8	10.0	15.0			
	1.3	14.4	17.5	10.4	15.5	2.6	1/20	中	S-P
Case8				8.6	14.0	5.0			
				5.9	10.0	15.0			

表-1 実験条件

(T:周期, H:波高, h:水深, 添字b:砕波点, 添字m:計測点, P:巻き波砕波, S:崩れ波砕波, S-P:崩れ巻き波砕波)

Case8では巻き波砕波と崩れ波砕波の中間形式(崩れ巻 き波砕波) であり, Case7とCase8ではSurf Similarity Parameterがほぼ等しく、それぞれ0.253と0.251であった. なお,全ての砕波は両側壁間において同時かつ一様に生 じることが確認されている. UVPによる波峰方向流速分 布の計測では、水路側壁の外側に設置した超音波トラン スデューサーから水路横断方向(v方向)に超音波パル スを照射し、両側壁間の超音波放射軸上128点(空間分 解能は小規模水路2.0mm,中規模水路4.7mm)の波峰方 向流速をサンプリング周波数50Hzで計測した.計測点は Case1~Case6では遷移領域 (x/h_m=5.1, 5.3) のトラフレ ベルであり, Case7とCase8では着水点近傍 (x/h_m=2.6), 遷移領域(x/h...=5.0)およびボア領域(x/h...=15.0)のト ラフレベルと底面近傍とした.本実験では全計測におい て造波開始から同一時刻の流速を取得するため、造波板 前面に設置した容量式波高計が1波目のゼロアップクロ ス信号を検知すると同時に出力されるTTLトリガー信号 によってUVPを起動する一方、このトリガー信号によっ て計測点上に設置した容量式波高計を起動することによ り流速分布と水位変動を同時に取得した.

なお,計測は全て混入気泡量が少ないトラフレベル以 下の水深で行われたため,本稿では混入気泡による計測 精度への影響は無いものとして議論する.

3. 実験結果

(1) 波峰方向流速分布の時空間変動特性

図-3はCase7とCase8の遷移領域(x/h_m=5.0)における 水位変動およびトラフレベルと底面近傍における波峰方 向流速分布の時系列を示している(試行計測30回のアン サンブル平均値). Case7では砕波クレスト通過後,トラ



図-3 Case7とCase8における水位変動(a)(d)およびトラフレベル(b)(e)と底面近傍(c)(f)における波峰方向流速分布の時系列((a)(b)(c);Case7, x/h_m=5.0,(d)(e)(f);Case8, x/h_m=5.0,試行計測30回のアンサンブル平均値)



図-4 水路横断面に発生する循環渦の様子((a); Case7, (b); Case8)

フレベルにおいて水路中央部から両側壁に向かう流速が 確認できる (図-3 (b)). 一方, 底面近傍ではトラフレベ ルとは反対に両側壁から水路中央部へ向かう流速が発生 する (図-3 (c)). したがって, Case7では水路横断面に おいて図-4(a)に示すような水面から水路側壁と底面を 経由する1対の循環渦が発生していると考えられる. Case8では砕波クレスト通過後,規則的な正負の流速変 動が水路横断方向の2箇所で発生し、さらにトラフレベ ルと底面近傍では流速分布の正負が反対となることから (図-3 (e) (f)),水路横断面において図-4 (b) に示すよ うな2対の循環渦が発生していることを表している.両 ケースでは水路幅が異なるが波高・周期に大きな差は無 く、流速分布から推定した循環渦の長さスケールは両ケ ースともほぼ等しく12cm~13cm程度であり,生成され る循環渦のスケールは水路幅に規定されるものではな い.また、砕波が生じない進行波ではこのような循環渦 の発生は確認されていないことから、循環渦は実験水路



 図-5 Case1(巻き波砕波)とCase4(崩れ波砕波)における水 位変動と波峰方向流速分の時系列((a)(b); Case1,(c) (d); Case4,試行計測1回の瞬時流速計測結果)



図-6 渦の長さスケールと時間スケールの決定方法(長さス ケール;ゼロアップ点の間隔L1,L2の平均値)

幅に起因する何かしら共鳴の様な変動によるものではなく, 砕波に伴って必然的に発生する流れであるといえる.

図-5はCase1とCase4における水位変動と波峰方向流速 分布の時系列を示している(試行計測1回の瞬時流速計 測結果). Case1では砕波クレスト通過直後,15cm/s以上 の強い流速が比較的短時間(0.4秒程度)で発生し,その 流速分布は波峰方向(y方向)に細かく正負に変動する (図-5(b),t=17.2s,19.2s).一方,Case4では砕波クレ スト通過直後の細かな流速変動は発生せず,クレスト通 過後において流速は時間的・空間的に比較的緩やかに変 動する.このように,砕波形式によって流速の時空間分 布が顕著に異なることから,砕波形式が砕波帯における 渦スケールの時空間変動特性を特徴付ける重要な要素で あるといえる.

(2) 渦スケールの決定方法

本研究では図-6に示すように,各時間における波峰方 向流速分布から流速のゼロアップ点を求め,各点の間隔 の平均値(図-6ではL1,L2の平均値)をその時間におけ る循環渦の長さスケールとした.時間スケールについて は,波峰方向流速分布の時系列に対して時間方向に流速 のゼロアップ点を求め,各点の時間間隔を循環渦の時間 スケールとした.また,計測軸上128点で得られた波峰 方向流速の標準偏差を各時間における循環渦の速度スケ ールとした.以下に示す結果では,各時間における循環



 図-7 Case1~Case3 (巻き波砕波) における水位変動 (a), 循環渦の長さスケール (b),時間スケール (c) および 速度スケール (d) の時系列



図-8 Case4~Case6 (崩れ波砕波) における水位変動 (a), 循環渦の長さスケール (b),時間スケール (c) および 速度スケール (d) の時系列



図-9 Case7(崩れ巻き波砕波)における水位変動(a),循環 渦の長さスケール(b),時間スケール(c)および速度 スケール(d)の時系列(黒;着水点近傍,灰;遷移領 域,点線;ボア領域)

渦の各スケールは試行計測30回のアンサンブル平均値で あり、循環渦の時間スケールは最大波峰方向流速が出現 するy=5cmでの流速で評価する.

(3) 渦スケールの時空間変動特性

図-7はCase1~Case3(巻き波砕波)における水位変動, 循環渦の長さ,時間および速度スケールの時系列を示し ている.砕波クレスト通過時では,長さスケールと時間 スケールが減少し,速度スケールはクレスト通過時に高 い値を示す.その後,長さスケールと時間スケールは増 加し,両スケールとも比較的高い値を維持する一方,速 度スケールは緩やかに減少する.

図-8はCase4~Case6(崩れ波砕波)における水位変動, 循環渦の長さ,時間および速度スケールの時系列を示し ている.砕波クレスト通過時では,Case1~Case3(巻き 波砕波)と同様に循環渦の長さスケールと時間スケール は減少し,速度スケールは増加する。その後,波浪の進 行に伴い長さスケールが増加する様子が確認できる.崩 れ波砕波ではクレスト通過後においても循環渦は比較的 同じ位置に滞在する傾向にあり,それらが波浪の進行過 程で伸張し渦の長さスケールが増加すると考えられる.

図-9はCase7(崩れ巻き波砕波)の着水点近傍(x/h_m= 2.6), 遷移領域(x/h_m=5.0),ボア領域(x/h_m=15.0)にお ける水位変動,循環渦の長さ,時間および速度スケール の時系列を示している.ここでは,循環渦の岸沖方向の 変化について説明する.着水点近傍では,長さ,時間ス ケールに大きな変化は見られず,循環渦が定常的に存在 する.本ケースでは砕波形式が崩れ巻き波砕波であった が比較的崩れ波砕波の傾向が強かった.そのため,遷移 領域では,各スケールとも図-8で示したCase4~Case6 (崩れ波砕波)とほぼ同等な変動特性を示している.ボ ア領域では,長さスケールの変動量は小さいが速度スケ ールが大きく変動する.

(4)物質の輸送・拡散に関わるパラメータ

ここでは、(3) で得られた各ケースにおける循環渦の 長さスケールL,時間スケールT_v,速度スケールUをも とにレイノルズ数Re,拡散係数D_Tおよび水表面の交換 に寄与すると考えられる循環渦による混合周波数f_T (Komoriら,1989)を計算し、これらの値から砕波帯に おける物質の輸送・拡散に関する相対的な特徴について 議論する.なお、Re=UL/v(v:動粘性係数)、D_T ≈ L²/T_v, f_T ≈ 1/T_vとして計算した.

図-10はCasel ~ Case3 (巻き波砕波)の水位変動(a) とRe, D_T , f_T の時系列を示している.クレスト通過時で はReと f_T は増加し D_T は減少する.その後,波浪の進行 とともにReと f_T は減少し D_T は増加する.砕波形式が巻 き波砕波の場合,砕波クレスト時に長さスケールの小さ な渦が水面の交換に大きく寄与し,その後,長さスケー ルの大きな循環渦が物質の拡散に対して主要な役割を果 たしていると考えられる.



 図-10 Case1 ~ Case3 (巻き波砕波)の水位変動(a)と循環 渦の各スケールから得られたレイノルズ数Re(b),拡 散係数D_T(c)および水面の交換周波数f_T(d)の時系列



 図-11 Case4 ~ Case6 (崩れ波砕波)の水位変動(a)と循環 渦の各スケールから得られたレイノルズ数Re(b),拡 散係数D_T(c)および水面の交換周波数f_T(d)の時系列



 図-12 Case7(崩れ巻き波砕波)の水位変動(a)と循環渦の 各スケールから得られたレイノルズ数Re(b),拡散係 数D_T(c)および水面の交換周波数f_T(d)の時系列 (黒;着水点近傍,灰;遷移領域,点線;ボア領域)

図-11はCase4~Case6(崩れ波砕波)の水位変動(a) とRe, D_T, f_Tの時系列を示している. Reとf_Tは図-10で 示したCasel~Case3(巻き波砕波)と同様な変動特性を 示す一方,f_Tは明確なピークが現れず定常的な値(1.5s⁻¹ 程度)を示している.砕波形式が崩れ波砕波の場合,図-8 で説明した同じ領域で比較的長時間滞在する循環渦が定 常的な水面の交換に大きく寄与している可能性がある.

図-12はCase7(崩れ巻き波砕波)の着水点近傍(xh_m = 2.6), 遷移領域(xh_m =5.0), ボア領域(xh_m =15.0)における水位変動(a)とRe, D_T, f_Tの時系列を示している. ここでは,物質の輸送・拡散に関する岸沖方向の変化について説明を行う.着水点近傍では,砕波ジェット着水後に生成された循環渦が発達する前に岸方向に輸送されるため各値に大きな変動は見られず,比較的定常的な物質拡散および水面の交換が行われているといえる.遷移領域では,各値とも図-11で示したCase4~Case6(崩れ波砕波)の結果とほぼ同様な傾向を示している.ボア領域では,クレスト通過時に発達した乱れの影響によりD_Tとf_Tが増加するが,他の位相では両値とも大きな変動は確認できず,比較的定常的な物質拡散および水面交換が行われていると推測できる.

(5) 渦スケールと物質拡散を特徴付けるパラメータ

図-13はCasel ~ Case7におけるフルード数と循環渦の 最大長さスケールとの関係を示している. なお, フルー ド数の代表長さと代表速度は各実験ケースにおける計測 点の波高と速度スケールを適用し, 長さスケールは計測 点の水深で無次元化している(長さ,速度スケールは10 波の最大値の平均値). 循環渦の長さスケールはフルー ド数が0.31程度まではほぼ一定であり, 0.38程度から急 に値が増加することが明確に示されている. このことか ら, フルード数によって循環渦の最大長さスケールを特 徴付けることが可能といえる.

図-14はCase1 ~ Case7におけるフルード数と拡散係数 D_Tとの関係を示している.なお、D_Tは各実験ケースの 波浪周期と計測点の水深で無次元化している.D_Tについ ても図-13と同様にフルード数が0.31程度まではほぼ一定 であり、0.38程度から急に増加することが示されている. したがって、D_Tもフルード数によって特徴付けることが 可能といえる.

4. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下に示す.

- 小規模および中規模水路においてUVPによる砕波帯の波峰方向流速分布の計測を行い,得られた波峰方向流速分布の時間空間変化から循環渦の長さ,時間および速度スケールの定量化・特徴化を行った.
- 2)小規模および中規模水路において水路横断面を循環 する渦が確認された.循環渦のスケールは水路幅の影 響によるものではなく,砕波に伴って必然的に発生する.



 図-13 Case1 ~ Case7におけるフルード数(F_r)と循環渦の長 さスケールとの関係(U_{max};最大速度スケール,H_m; 計測点の波高,L_{max};最大長さスケール,h_m;計測点 の水深)



図-14 Case1 ~ Case7におけるフルード数と拡散係数D_Tとの 関係(T;波浪周期,その他は図-13と同様)

- 3)巻き波砕波では、砕波クレスト通過時に発達する長 さスケールの小さな渦が水面の交換に大きく寄与す
 る.その後、長さスケールの大きな循環渦が物質拡散 に対して主要な役割を果たしていると考えられる。
- 4)崩れ波砕波では、クレスト通過後において同一領域 に比較的長時間滞在する循環渦が定常的な水面の交換 に寄与していると考えられる。
- 5)循環渦の各スケールは岸沖方向に変化する.着水点 近傍では長さスケールの大きい渦が定常的に存在し, 遷移領域では波浪の進行に伴い各スケールは大きく変 動する.ボア領域では長さスケールが比較的一定であ り速度スケールの変動量が大きい.
- 6) 循環渦の最大長さスケールおよび拡散係数は代表長 さを計測点の波高,代表速度を最大速度スケールとし たフルード数によって特徴化が可能といえる.

参考文献

- 大塚淳一・渡部靖憲(2006):三次元的砕波遷移に伴う波峰方 向流速と渦スケールの時空間変化,海岸工学論文集,第 53巻, pp. 86-90.
- 角野昇八・斉藤 満・山西和也 (1995):海浜の砕波による酸 素取り込み機能に関する実験的再考察,海岸工学論文集, 第42巻, pp. 1181-1185.
- Komori, S., Y. Murakami, and H. Ueda (1989): The relationship between surface-renewal and bursting motions in an openchannel flow, J. Fluid Mech., Vol. 203, pp. 103-123.
- Nadaoka, K., M. Hino, and Y. Koyano (1989): Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, J. Fluid Mech., Vol. 204, pp. 359-387.
- Watanabe, Y., H. Saeki, and R.J. Hosking (2005): Three-dimensional vortex structures under breaking waves, J. Fluid Mech., Vol. 545, pp. 291- 328.