

沿岸域における Backwash 渦の実験的研究 Experimental study on backwash vortex in coastal zone

○鈴木優志・山上路生・杉原裕司・松本知将・岡本隆明

○Masashi SUZUKI・Michio SANJOU・Yuji SUGIHARA・Kazumasa MATSUMOTO・Takaaki OKAMOTO

This study investigates the generation and effects of backwash vortices in the surf zone using laboratory wave-flume experiments. Velocity distributions were measured by PIV and vortex regions were identified from rotational indicators. Based on the detected vortex area, the vortex kinetic energy could be evaluated and compared with the wave mechanical energy per wavelength, which is a key parameter of local sediment transport. In addition, movable-bed tests were conducted to examine bed-profile evolution under regular waves, revealing that vortex-related processes contribute to local scour, step formation, and subsequent sediment deposition and shoreline advance.

1. 序論

我が国の海岸は防災・環境・利用の基盤である一方、高波浪や高潮等にさらされ、侵食の進行は防護機能の低下につながる。砕波帯では流れ場が強い非定常乱流を呈するため、底質輸送機構には未解明な点が多い。特に、砕波帯付近に発生するとされる乱流渦構造の特性と底質移動との対応を定量的に整理した研究は十分とはいえない。そこで本研究では、造波水路における PIV 流速計測により詳細な流速場を取得し、砕波帯に発生する「backwash 渦」に着目して、その生成機構と特性を解明する。さらに、移動床実験による底質移動の観察結果と対応させることで、この渦構造が局所的な地形変化に果たす役割について考察を行う。

2. 既往研究

Matsunaga and Honji¹⁾はスロープを遡上する波の水面下で発生する backwash 渦の発生について実験を行っている。実験は透明なプラスチックで作られた造波水槽で行っており、水よりもわずかに大きい比重を有するおがくずを、流れの可視化に用いている。実験結果では、進行する段波に対して backwash が入り込む場所において、水路側面から岸側を右向きとする座標系で観察した場合に、反時計回りの渦が形成されることが示された。また、おがくずは砕波による効果だけでなく、渦による巻き上げが生じることも確認されている。

3. 実験方法

実験には、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリに設置された幅 20.5cm、長さ 7m の造波水路を用いた。図-1 に水路および実験の模式図を示す。水路内にアクリルスロープを設置し、勾

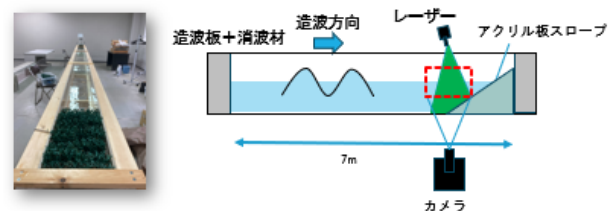


図-1 実験に使用した水路および実験の模式図

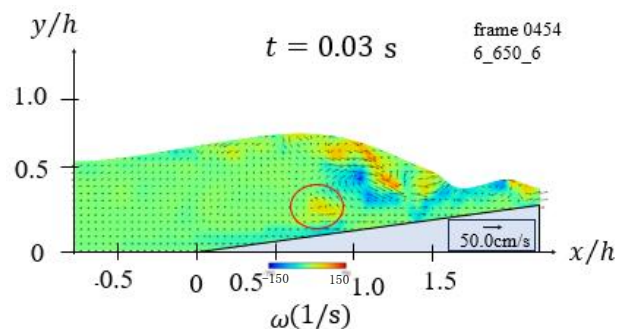


図-2 瞬間流速ベクトル分布の一例

配を 4.5°, 6°, 10° に設定したうえで、静水深 7cm の条件下で造波条件を変化させ規則波を発生させた。続いて、砕波帯を高速カメラ (200fps) で約 15 秒間撮影し、各ケースについて PIV 流速計測を行った。

4. Backwash 渦の生成機構と特性

4.1 Backwash 渦の可視化

PIV 流速計測結果を速度ベクトル図として示す。図-2 は、backwash 渦の発生時刻から 6 フレーム後 (0.03s 後) における瞬間流速ベクトル分布の一例であり、渦度分布をコンターとして重ねて示した。さらに、backwash 渦は発生後、遡上流れに伴って岸側へ移流する。そこで、速度ベクトル図上で渦

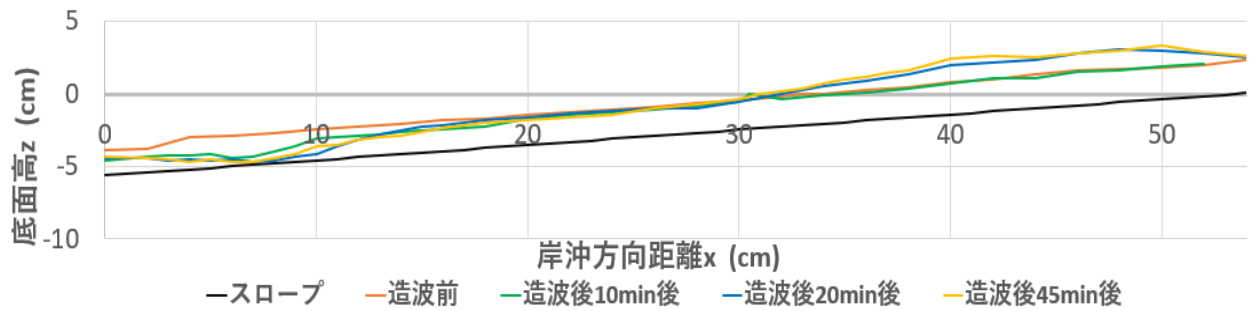


図-3 底面形状の時間変化

構造を明瞭に可視化するため、各サンプル渦の中心における流速を平均して代表速度 u_c を定義し、 u_c を差し引いた相対速度ベクトルとして表示した。ここでは図示していないが、渦の発生有無の判定には、渦度が正かつ λ 値が正となる領域をbackwash渦として判定している。図-2より、砕波点のやや沖側に反時計回りの流速構造が形成され、図で示した箇所でbackwash渦が発生していることが分かる。また、当該領域では渦度が正の領域と λ 値が正の領域の空間分布が一致した。本ケースの渦の持続時間は平均0.1975 sであった。渦の生成機構としては、砕波に伴う遡上流れと戻り流れの干渉により砕波点付近で上昇流が生じ、周辺底層でせん断が強化されて不安定性が発達し、渦が生成された可能性が高いと考えられる。

4. 2 Backwash 渦のエネルギー

流速計測を実施した全30ケースのうち、backwash渦の発生が確認された15ケースを対象として、渦が保有するエネルギーを評価した。本研究では、渦領域内の流体の運動エネルギーを渦エネルギー E_b と定義し、以下の式により算出した。

$$\frac{E_b}{\rho} = \sum_{(i,j) \in \Omega_k} \frac{1}{2} (u_{ij}^2 + v_{ij}^2) \Delta S \quad [\text{cm}^4/\text{s}^2]$$

ここで ρ は水の密度、 u_{ij}, v_{ij} は計算格子 (i, j) における瞬間流速(cm/s)、 ΔS は格子セル面積(cm^2)、 Ω_k 渦領域(ラベル k の領域)である。また造波された波の力学的エネルギーについて微小振幅波理論に基づき、単位幅・一波長あたりの波の力学的エネルギー E_L を以下のように定義する。

$$\frac{E_L}{\rho} = \frac{1}{8} g H^2 L \quad [\text{cm}^4/\text{s}^2]$$

g は重力加速度(cm/s^2)、 H は沖波波高(cm)、 L は沖波波長(cm)である。ここで一波の力学的エネルギーのうち、どの程度の割合が渦の生成に寄与されるかを評価するため、各ケースについて渦エネルギーと波の力学的エネルギーの比 E_b/E_L を算出

表-1 各ケースにおける造波条件および渦と波のエネルギー比 E_b/E_L

ケース名	5_800_10	3_800_4.5	5_800_6
波形勾配	0.02	0.01	0.02
周期(s)	1.12	1.12	1.12
勾配	10	4.5	6
E_b/E_L (%)	4.96	3.66	2.18

した。代表的なケースの結果を表-1に示す。 E_b/E_L は全体として数%オーダーであり、造波条件およびスロープ勾配により変動した。

5. Backwash 渦による土砂輸送

スロープ勾配 6°の斜面上にガラスビーズを約2cm厚で敷設し、波形勾配0.0166、周期1.12sの規則波を一定時間造波して地形変化を観察した。図-3に底面形状の時間変化を示す。底面形状は造波前、造波開始後10分、20分、45分（造波停止時）の計4時刻で計測した。座標系は、 x 軸の正方向を岸向きとし、 $x=0$ をスロープ端点、 $z=0$ を静水面とする。造波開始直後から砕波点の沖側で洗掘が生じ、約10分でstep地形が形成された。step形成位置は時間経過とともに岸側へ移動したが、20分以降は進行がほぼ停止した。また岸側ではガラスビーズの堆積が進行し、汀線の前進が確認された。

6. 結論

PIV流速計測に基づき、回転指標から渦領域を同定して渦運動エネルギーを算出した。加えて、波長当たりの波の力学的エネルギー E_L に対する比 E_b/E_L を算出した結果、 E_b/E_L は概ね数%の範囲に収まった。また移動床実験により、backwash渦に起因するstep地形を伴う底面形状の変化と、汀線の前進を確認した。

参考文献

1) N Matsunaga and H Honji. The backwash vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 99(4):813–815