

砕波乱流による漂砂輸送を考慮した高精度漂砂モデルの開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
 研究期間：平成 22 年度～平成 24 年度
 担当チーム：寒冷沿岸域チーム
 研究担当者：大塚淳一、菅原吉浩

【要旨】

造波水路内に設置した移動床上の砕波帯において流速場と浮遊砂濃度をそれぞれ Particle Image Velocimetry (PIV) と光学式濁度計で計測した。砕波クレスト通過後、比較的強い乱れエネルギーが水面から底面方向に分布し、戻り流れが発達する位相においてより強い乱れエネルギーが岸側から移流する。遷移領域では大量の浮遊砂が生成されるが、戻り流れによって浮遊砂は沖側へ輸送されるため時間平均値で見ると浮遊砂濃度が高い領域は遷移領域よりも沖側に分布する。底面近傍における最大浮遊砂濃度と最大乱れエネルギーの関係は概ね直線で近似される。この近似式から底面近傍における浮遊砂発生に必要な乱れエネルギーを見積もると $6.6 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ となる。

キーワード：浮遊砂、砕波、乱れ、Particle Image Velocimetry (PIV)、移動床実験

1. はじめに

砕波帯で大量に巻き上がる浮遊砂は波・流れによる輸送・拡散過程を経由して、沿岸域の地形変化に大きく影響を与えることが指摘されている。砕波による底質の浮遊現象はおもに砕波ジェット着水後に生成される激しい乱れに起因することが知られている。したがって、砕波帯における底質の浮遊量や輸送特性を評価するためには、砕波に伴う流速の時空間変動を明らかにすることが必要であり、既往の研究においてレーザー流速計や Particle Image Velocimetry (PIV) を用いた流速計測および乱れの定量化が行われている（例えば、Nadaoka et al, 1989、Cox & Kobayashi, 2001、Kimmoun & Branger, 2007）しかしながら、既往の研究の多くが固定床で行われており、固定床上で得られた流速や乱れに関する情報から底質の浮遊・輸送特性を直接評価・検証することは困難といえる。

そこで本研究では、移動床上における砕波帯の流速場を PIV で計測し、さらに光学式濁度計を用いて浮遊砂濃度を計測することにより、砕波による流速・乱れの時空間変動と底質の浮遊・輸送特性との関係性を評価する。

2. 実験方法と実験条件

実験は長さ 24.0 m、幅 0.4 m、高さ 1.0 m の二次元造波水路の一端に勾配 1/20、深さ 10 cm のサンドピットを設置して行われた（中央粒径 0.20 mm の珪砂を使用）。座標系については砕波点を原点に岸方向を x 、水路側壁の一端から水路横断方向を y 、静水面から鉛直上向きを z と定義する。実験条件は表-1 に示す砕波形式が異なる 2 ケースとし、両ケースの砕波点から汀線近傍までの流速場を高速ビデオカメラを用いて撮影した。撮影範囲は底

表-1 実験条件

実験ケース	T (s)	H_0 (cm)	H_b (cm)	h_b (cm)	勾配	砕波形式	Surf similarity parameter
Case1	1.4	9.7	12.5	13.8	1/20	S	0.247
Case2	1.8	10.1	14.7	15.0	1/20	S-P	0.293

(T : 周期, H_0 : 沖波波高, H_b : 砕波波高, h_b : 砕波水深, S: 崩れ波砕波, S-P: 崩れ巻き波砕波)

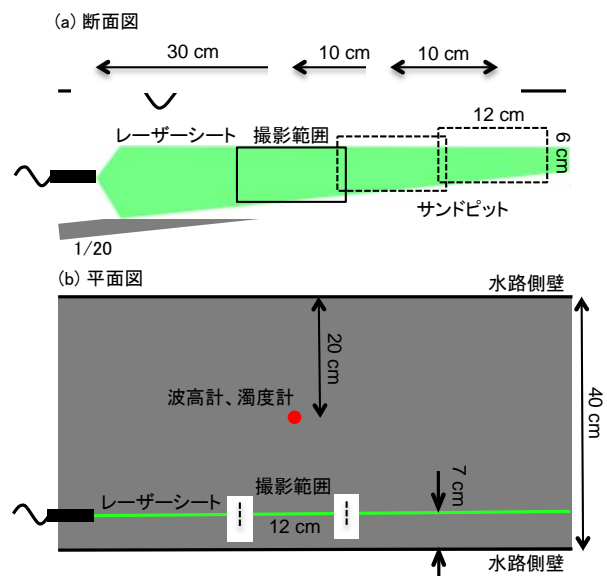


図-1 実験装置の配置図

面を含む水平方向 12 cm × 鉛直方向 6 cm であり、この範囲を図-1 (a) に示すように砕波点から岸方向へ 10 cm ずつ移動して撮影した。撮影条件はフレームレート 250 fps、シャッタースピード 1/1500 frame、解像度 1200 × 600 pixel に設定した。撮影を行う際には、赤色蛍光塗料で着色し

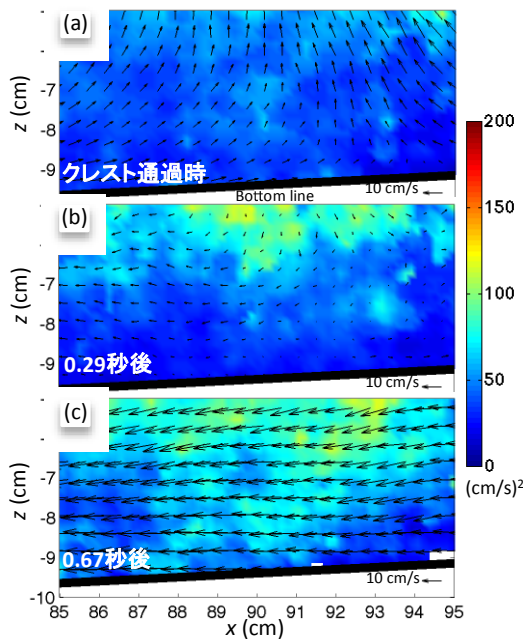


図2 Case1、 $x=90$ cm (遷移領域) の流速ベクトルと乱れエネルギーの時空間変化 (全ベクトルの 1/3 を表示)

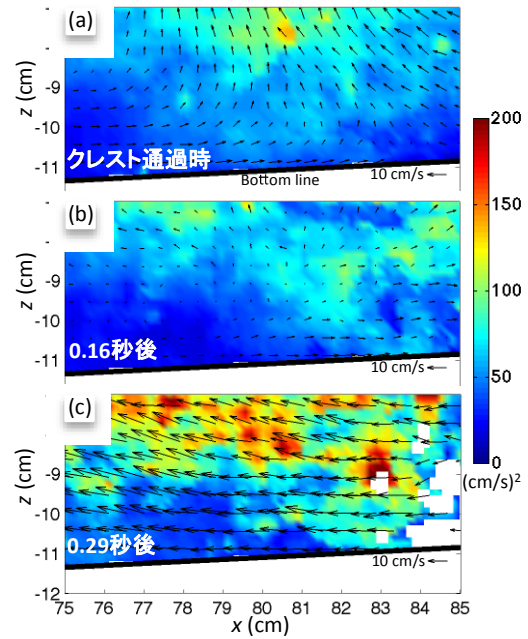


図3 Case2、 $x=80$ cm (遷移領域) の流速ベクトルと乱れエネルギーの時空間変化 (全ベクトルの 1/3 を表示)

た比重 1.02 の中立粒子を造波水路内に投入し、図-1(a) に示すように撮影範囲中心から沖側に 30 cm 離れた位置から緑色レーザーシート (波長 532 nm) を照射した。レーザーシートが照射された範囲では中立粒子に着色された蛍光塗料が励起して赤色に光り (励起波長 630 以上)、浮遊砂と混入気泡は砂粒子表面と気泡界面からレーザー光を反射するため緑色に光る。本実験では高速ビデオカメラのレンズ前面に透過波長 630 nm 以上の光学フィルターを設置することにより、水粒子 (赤色中立粒子) を浮遊砂および混入気泡と区別して撮影した。撮影後は各画像に対して FFT 相互相関法による PIV 解析を行った。本研究で使用した PIV プログラムでは、検査領域 31 pixel、探査領域 73 pixel、検査領域の移動距離 15 pixel と設定し、撮影範囲の瞬時流速ベクトルを空間分解能 1.5 mm で求めた。なお、レーザーシートと水路側壁の距離が増加するとシート前面を通過する浮遊砂量と混入気泡量が増加するため、高速度ビデオカメラでシート面上の水粒子を捉えることが困難となる。そこで予備実験を行い、シート面上の水粒子を撮影可能なシートと側壁間の最大距離を求め、その距離を 7 cm に設定した (図-1(b) 参照)。撮影時に造波板前面から岸側 5.8 m (A 点) と 10.6 m (B 点) および撮影範囲の中心に容量式波高計を設置し、水位変動量をサンプリング周波数 100 Hz で計測した。高速度ビデオカメラと撮影位置に設置した波高計は B 点に設置した波高計が 1 波目を検知した時に出力される TTL トリガー信号によって同時に起

動するように設定した。また、本実験では光学式濁度計を各撮影位置に設置し、底面から 1、2、3、5、7 cm の浮遊砂濃度をサンプリング周波数 100 Hz で計測した。なお、計測機器の配置上の問題から、浮遊砂濃度の計測は流速場の撮影と水位変動量の計測とは別に行った。浮遊砂濃度の計測においても波高計を流速場の撮影時と同じ位置に設置し、撮影時と同様に出力される TTL トリガー信号によって濁度計を起動した。濁度計センサー部を混入気泡が通過する際に記録されるスパイク状波形の除去・補間については佐藤ら (1989) の方法を適用した。流速場と水位変動量の計測は各位置で 45 回、浮遊砂濃度の計測は 20 回行った。以下に示す実験結果では、これらの計測結果のアンサンブル平均値をベースに流速場の時空間変動特性と底質の浮遊・輸送特性およびこれらの関係について説明する。

3. 実験結果

図-2、図-3 はそれぞれ、Case1 と Case2 の遷移領域における碎波クレスト通過後の流速ベクトルと乱れエネルギーの時空間変化を示している。各流速ベクトルは流速場の撮影と PIV 解析で得られた全 45 個の流速データから異常値を除去し、残ったデータを有効データとしてアンサンブル平均したものである。両図では有効データ数 25 個以上でアンサンブル平均された流速ベクトルを表示している。なお、乱れエネルギー k は

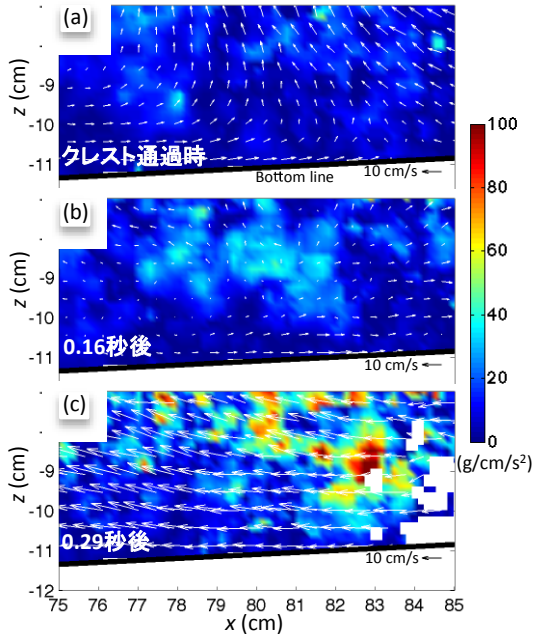


図-4 Case2, $x=80$ cm (遷移領域) の流速ベクトルとレイノルズ応力 (絶対値) の時空間変化

$$k = \frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}}{2}$$

$\overline{u'} = \overline{u} - \overline{u}$ 、 $\overline{v'} = \overline{v} - \overline{v}$ で求められ、 \overline{u} 、 \overline{v} 、上部バーはそれぞれ瞬時水平流速、瞬時鉛直流速、アンサンブル平均を表している。遷移領域では砕波クレスト通過後、岸向きの流速が徐々に低下し比較的強い乱れエネルギーが水面から底面方向に分布する。その後、戻り流れが発達する位相でより強い乱れエネルギーが底面まで到達する。この位相における強い乱れは撮影範囲よりも岸側で発達した乱れがその勢力を比較的保ったまま戻り流れによって沖側へ移流されたものと考えられる。乱れの強さは Case2 (Spilling-Plunging) のほうが大きく、Case2 では Case1 (Spilling) よりもさらに深い領域まで強い乱れエネルギーが供給される。この底面まで供給される強い乱れエネルギーは底質の巻き上げに大きく寄与していると考えられる。

図-4 は Case2 の遷移領域における砕波クレスト通過後の流速ベクトルとレイノルズ応力の絶対値の時空間変化を示している。各図の位相は図-3 と対応している。また、各流速ベクトルは図-3 と同一である。レイノルズ

応力 τ は $\tau = \rho \overline{u'v'}$ (ρ : 水の密度) で求められる。

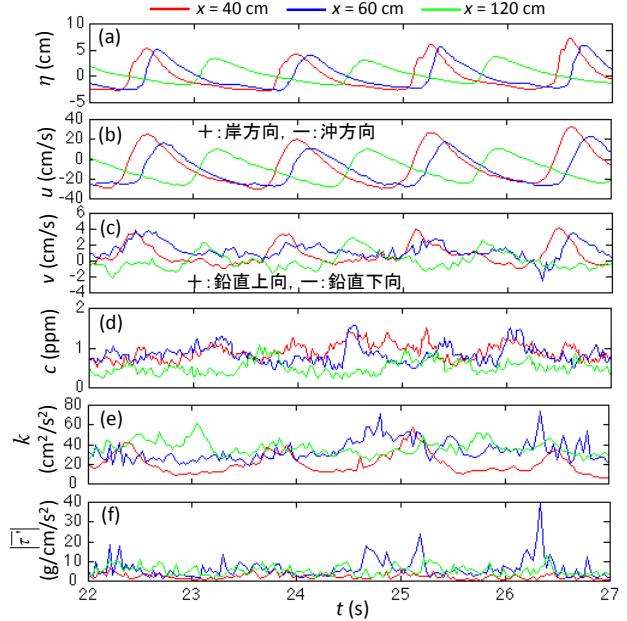


図-5 Case1 の(a)水位変動と底面上方 1 cm の(b)水平流速、(c)鉛直流速、(d)浮遊砂濃度、(e)乱れエネルギー、(f)レイノルズ応力 (絶対値) の時系列

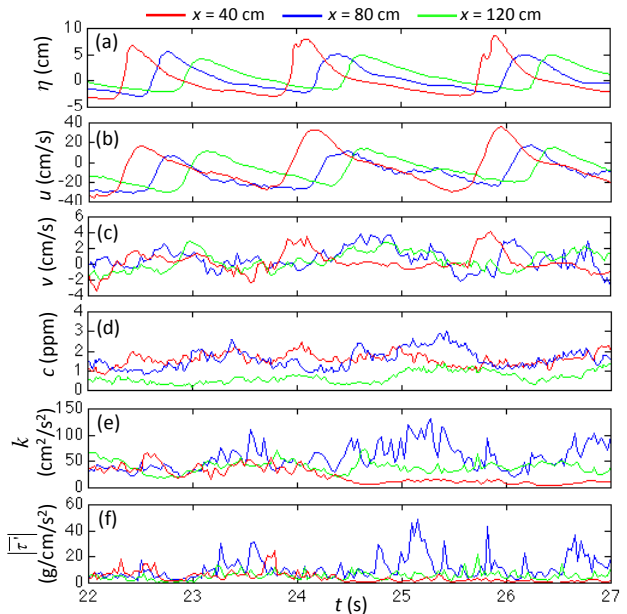


図-6 Case2 における図-5 と同様の測定値

図-3 と図-4 を比較すると、各位相の比較的強い乱れエネルギーを示す領域でレイノルズ応力が高い値を示す様子が確認できる。砕波帯では底面境界層で発生するレイノルズ応力に加えて、砕波クレスト通過後に生じる強い乱れに伴うレイノルズ応力も底質移動に大きく寄与していると考えられる。

図-5 は Case1 の (a)水位変動と底面上方 1 cm における (b)水平流速、(c)鉛直流速、(d)浮遊砂速度、(e)乱れエネルギー、(f)レイノルズ応力の絶対値を示している。なお、

(a)水位変動は 45 回計測した結果のアンサンブル平均値、(d)浮遊砂濃度は 20 回計測した結果のアンサンブル平均値、その他は 45 回計測した結果の有効データ数 25 回以上のアンサンブル平均値である。図中の赤線は砕波ジェット着水点近傍、青線は遷移領域、緑線はボア領域の結果を示している。また、図-6 は Case2 における図-5 と同様の測定値を示している。両ケースの浮遊砂濃度、乱れエネルギーおよびレイノルズ応力の絶対値を比較した場合、Case2 は Case1 の 2 倍程度の値を示している。一方、水平流速と鉛直流速を比較した場合、両ケースで大きな差はみられない。この結果は従来、実験や現地観測の様子から指摘されていたように、砕波帯における底質の巻き上げには乱れが重要な役割を果たしていること、また、乱れの強さには砕波形式が深く関与することを明確に示している。

図-7、図-8 はそれぞれ Case1 と Case2 の浮遊砂濃度、水平・鉛直流速、乱れエネルギーおよびレイノルズ応力（絶対値）の時間平均値の空間分布を示している。なお、浮遊砂濃度の空間分布は各計測点での時間平均値を空間的にスプライン補間した結果を示している。砕波帯で大きな乱れが発生する領域（遷移領域）では、底質の巻き上げが活発であり、さらに比較的大きな流速をもつ戻り流れが発生するため巻き上げられた底質はその場に長時間滞在せず、沖側へ輸送される。そのため、浮遊砂濃度と乱れの間を時間平均値で評価した場合、浮遊砂濃度が最大となる位置は乱れが最大となる位置よりも沖側（砕波ジェット着水点近傍）に現れる。

図-5 と図-6 の結果を用いて、各砕波クレスト通過後における底面上方 1 cm の最大浮遊砂濃度とその前後の 1/4 周期以内に現れる乱れエネルギーの最大値との関係をプロットした結果を図-9 に示す。なお、 $x=40\text{ cm}$ の浮遊砂濃度の計測結果は戻り流れによって沖へ輸送された浮遊砂を多く含むと判断し、評価対象から外している。最大浮遊砂濃度と乱れエネルギーの最大値との関係は直線で概ね近似される様子が確認できる。底面上方 1 cm で浮遊砂が発生すると仮定した場合、浮遊砂の発生に必要な乱れエネルギーは $6.6\text{ cm}^2/\text{s}^2$ となる。同様な方法で両者の関係をさらに底面に近い位置で得ることにより、乱れによる底質も巻き上げ量がより詳細に推定できると考えられる。

4. まとめ

本年度得られた主要な研究成果を以下に示す。

1) 砕波クレスト通過後、比較的大きな乱れエネルギーが

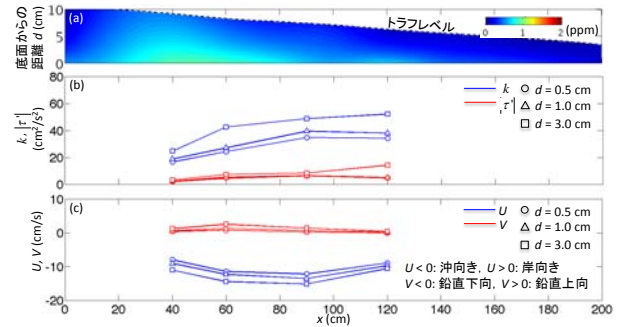


図-7 Case1 における(a)浮遊砂濃度、(b)乱れエネルギーとレイノルズ応力（絶対値）、(c)水平・鉛直流速の時間平均値の空間分布

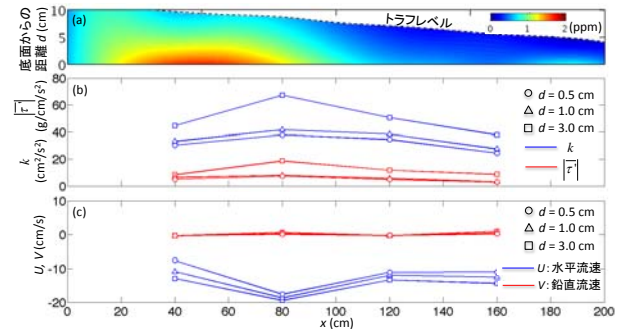


図-8 Case2 におけると同様の測定値

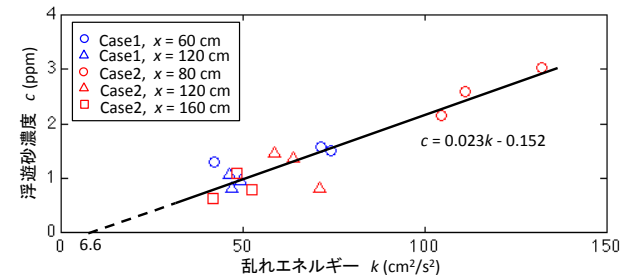


図-9 砕波クレスト通過後における底面上方 1 cm の最大浮遊砂濃度と最大乱れエネルギーの関係

- 水面から底面方向に分布し、戻り流れが発達する位相においてより強い乱れエネルギーが岸側から移流する。
- 2) 砕波クレスト通過後、比較的大きな乱れエネルギーが確認される領域でレイノルズ応力は高い値を示す。
- 3) 強い乱れを伴う遷移領域では大量の浮遊砂が生成されるが、戻り流れによって浮遊砂は沖側へ輸送されるため、時間平均値でみると浮遊砂濃度が高い領域は遷移領域よりも沖側（砕波ジェット着水点近傍）に分布する。
- 4) 底面近傍における最大浮遊砂濃度と最大乱れエネルギーの関係は概ね直線で近似される。この近似式から底面近傍における浮遊砂発生に必要な乱れエネルギーを見積もると $6.6\text{ cm}^2/\text{s}^2$ となる。

参考文献

- Nadaoka K., M. Hino and Y. Koyano: Structure of the turbulent flow field under breaking waves in the surf zone, *J. Fluid Mech.*, Vol. 204, pp. 259-387, 1989
- Daniel T. Cox and N. Kobayashi: Identification of intense, intermittent coherent motions under shoaling and breaking waves, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, C6, pp. 14223-14236, 2000
- Kimmoun O. and H. Branger: A particle image velocimetry investigation on laboratory surf-zone breaking waves over a sloping beach, *J. Fluid Mech.*, Vol. 588, pp. 353-397, 2007
- 佐藤慎司、本間基一、柴山知也：砕波による底質の巻き上げ量の評価に関する実験的研究、*海岸工学論文集*、第 36 巻、pp. 279-283、1989

SEDIMENT TRANSPORT MODEL IN WAVE BREAKING TURBULENT FLOWS

Budgeted: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2010-2012

Research Team: Port and Coast Research Team,

Author: OTSUKA Junichi, SUGAWARA Yoshihiro

Abstract: Velocity field and suspended sediment concentration in surf zones were experimentally measured using a Particle Image Velocimetry system and an optical concentration probe, respectively. Strong turbulent energy is generated downward when a breaking wave front passes, and then more intense turbulent energy is transported from the shoreside by undertow. A large amount of sediments are instantaneously suspended in the transition region, and those are transported offshore by undertow. Thus the sediment concentration increases with time in the deeper region. The relations between the maximum turbulent energy and the maximum concentration near the bottom under breaking waves can be roughly approximated by a linear equation.

Key words: Suspended sediment, Breaking wave, Turbulent flow, Particle Image Velocimetry (PIV), Movable bed experiments