

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月10日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究B

研究期間：2010年度～2012年度

課題番号：22760378

研究課題名（和文）砕波混相乱流ダイナミクスに基づく高精度沿岸物質輸送モデルの開発

研究課題名（英文）Modeling of the sediment transport based on multiphase turbulent flow dynamics in surf zones

研究代表者

大塚 淳一（OTSUKA JUNICHI）

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所・研究員

研究者番号：50540556

研究成果の概要（和文）：移動床を設置した二次元断面水路（勾配1/20）で水理実験を行い、砕波帯の流速、乱れエネルギー、浮遊砂濃度の時空間変動を計測した。波エネルギーフラックスの減衰率から浮遊砂巻き上げ係数を評価した場合、巻き上げ過程のスケール効果の影響により、現地観測・大規模実験の結果をから得られた値よりも100倍以上大きな値となる。また、時間平均値で評価した場合、底面近傍では乱れエネルギーの増加に伴い浮遊砂濃度も上昇する。

研究成果の概要（英文）：We measured the velocity field and suspended sediment concentration in laboratory surf zones using a Particle Image Velocimetry (PIV) and an optical concentration probe to clarify the sediment transport process under breaking waves. The pick-up coefficient acquired in this small-scale experiment was much higher than that in the large-scale experiments and field observations. The sediments are immediately suspended when the turbulent energy is provided to the bed. Suspended sand concentrations near the bottom tend to increase with the turbulent energy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：水工学

キーワード：砕波、乱流、浮遊砂

1. 研究開始当初の背景

波浪が沖から岸に向かって進行すると水深の低下に伴い波形が急峻化して、最終的に波頂部から波が崩れる現象、砕波が生じる（図1参照）。沿岸域の砕波が生じる領域（以下、砕波帯）では海底から大量の土砂が巻き上がる。砕波帯で巻き上がった土砂は波や流れによって広い範囲に輸送されるため、周辺海域の地形変化に影響を与えることが指摘



図1 沿岸域で生じる波浪の砕波の様子

表 1 実験条件

実験	T	H_0	H_b	h_b	勾配	砕波	Surf similarity
ケース	(s)	(cm)	(cm)	(cm)	-	形式	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
Case3	2.0	8.9	13.7	14.1	1/20	P	0.337

(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、P: 巻き波砕波、S-P: 崩れ巻き波砕波)

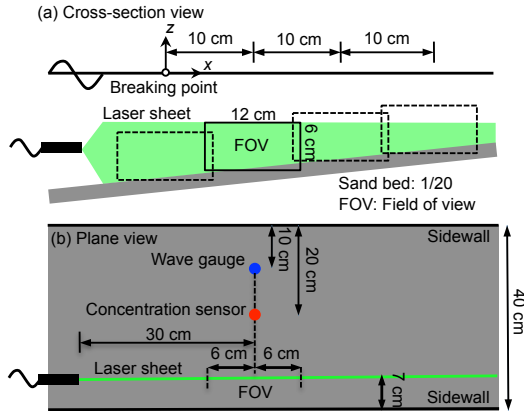


図 2 実験方法の概要

されている。したがって、沿岸域の地形変化量を精度良く予測するためには、砕波帯における底質の浮遊量および拡散特性を定量的に評価することが重要であり、多くの研究者によって砕波帯の流況や浮遊土砂量の計測およびそれらのモデル化に関する研究が行われている。しかしながら、砕波帯では大量の気泡と底質が混在する極めて複雑な混相乱流場が形成されるため、流体・底質各相の物理量を計測することが難しく、いまだ砕波帯の土砂輸送に関しては十分な知見が得られていないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、いまだ不明な点が多い砕波混相乱流場における底質の浮遊量および輸送過程を定量的に評価することを目的として、二次元造波水路を用いた水理実験を行い、波エネルギーフラックス減衰率と浮遊砂巻き上げ係数との関係および流体の乱れエネルギーと浮遊土砂量との関係を明らかにした。

3. 研究の方法

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)。実験条件は表 1 に示すように、砕波形式が異なる 3 ケースとした。各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

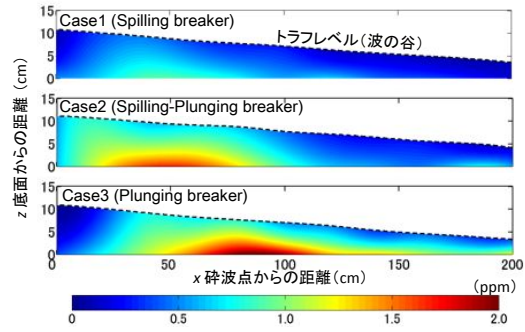


図 3 浮遊砂濃度の時間平均値の空間分布

影した。撮影範囲は底面を含む水平方向 12 cm×鉛直方向 6 cm であり、この範囲を砕波点から岸方向へ 10 cm ずつ移動して撮影した (図 2 参照)。撮影条件はフレームレート 250 fps、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た比重 1.02 の中立粒子を造波水路内に投入し、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。レーザーシート内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 nm 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 以上の光学ハイパスフィルターを設置して赤色中立粒子のみを撮影した。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。PIV 解析では、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、空間分解能 1.5 mm で流速分布を求めた。撮影を行う際には造波板前面から 5.8 m (A 点、沖波計測用) と 10.6 m (B 点) の位置および撮影範囲の中心 (M 点) に容量式波高計を設置して水位変動量を計測した (サンプリング周波数 100 Hz)。高速度ビデオカメラと M 点の波高計は B 点の波高計が 1 波目を検出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 の浮遊砂濃度を計測した (サンプリング周波数 100 Hz)。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。計測を行う際には底面をならした状態で造波し、各装置の起動後から 30 秒間計測を行った。流速場の撮影と水位変動量の計測は各位置で 80 回、浮遊砂濃度の計測は 20 回繰り返した。

4. 研究成果

(1) 砕波帯の浮遊砂濃度の空間分布

図 3 は浮遊砂濃度の時間平均値の空間分布

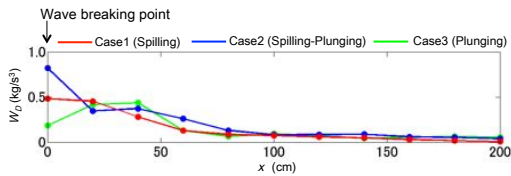


図4 波エネルギーフラックス減衰率の岸沖分布

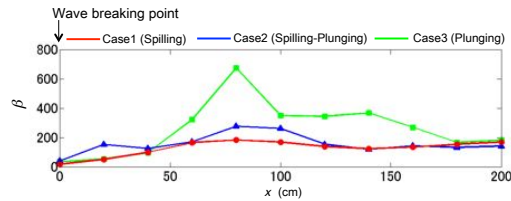


図5 浮遊砂巻き上げ係数の岸沖分布

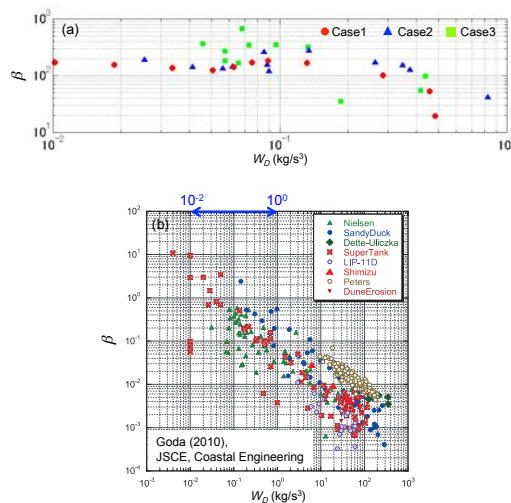


図6 波エネルギーフラックス減衰率と浮遊砂巻き上げ係数の関係 ((a): 本実験結果、(b): 大規模実験、現地観測結果 (合田、2010))

を示している。砕波帯の浮遊砂濃度は砕波形式によって大きく異なり、崩れ波砕波(Case1)では全体的に濃度が低く、巻き波砕波(Case3)が最も高い値を示す。また、各ケースとも、砕波点からやや岸側 ($x = 50 \sim 100$ cm 程度)の遷移領域において最も高い濃度を示す。ここで、遷移領域とは波頂部から砕波ジェットが水面に突入した後、波浪が進行する過程において三次元的な大規模渦が生成・発達する領域である。また、遷移領域より岸側において波浪が段波状に進行する領域をボア領域と呼ぶ。このボア領域では乱れのスケールの低下に伴い浮遊砂濃度は徐々に減少する。

(2) 波エネルギーフラックス減衰率と巻き上げ係数の関係

図4は波エネルギーフラックスの減衰率 W_D の岸沖分布を示している。 W_D は各ケースとも砕波点付近で比較的大きな値を示す。また、砕波点からの距離の増加に伴い値は徐々

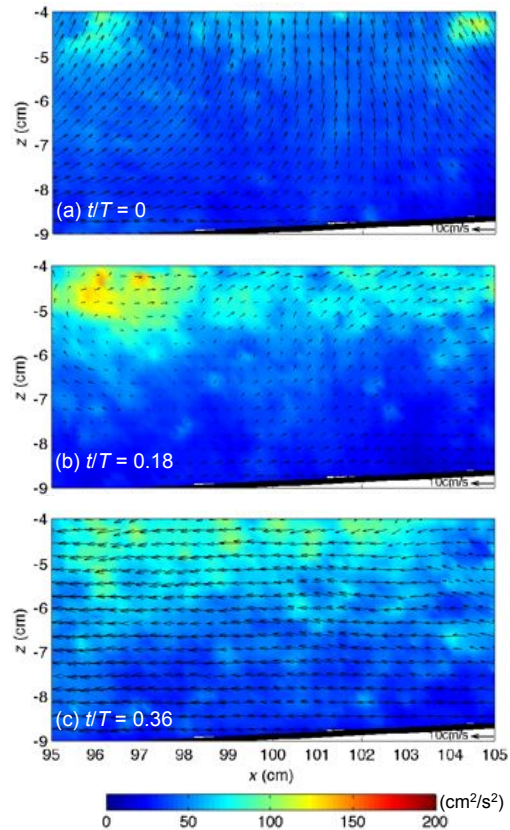


図7 Case1、 $x = 100$ cm (遷移領域)における流速ベクトルと乱れエネルギーの空間分布の時間変化 (全ベクトルの $1/3$ を表示)

に低下し、砕波点から 100 cm より岸側のボア領域では各ケースとも値はほとんど変化しない。砕波点での値は砕波形式で大きく異なるが、遷移領域付近ではそれほど大きな差はみられない。

図5は浮遊砂巻き上げ係数 β の岸沖分布を示している。ここで、 β は合田 (2010、海岸工学論文集) を参考に求めた。 β は各ケースとも砕波点からの距離の増加に伴って増加し、遷移領域で最大値を示す。また、砕波形式による差も大きく、巻き波砕波 (Case3) では、他のケースよりも3倍程度高い値を示している。この結果と図4で示した結果より、砕波による砂の巻き上げは波エネルギーフラックスの減衰率のみでは適切に評価することが難しく、砕波による乱れの影響を考慮することが重要であるといえる。

図6は W_D と β の関係を示している ((a): 本実験結果、(b): 合田 (2010) による大規模実験、現地観測データから得られた結果)。両図の $10^{-2} \leq W_D \leq 10^0$ で比較した場合、本実験結果の β の範囲は約 $20 \sim 700$ であるのに対して、大規模データでは約 $0.004 \sim 10$ に分布している。この結果は小規模実験と現地・大規模実験では底質の浮上可能な相対位置が異なること、つまり、巻き上げ過程のスケール

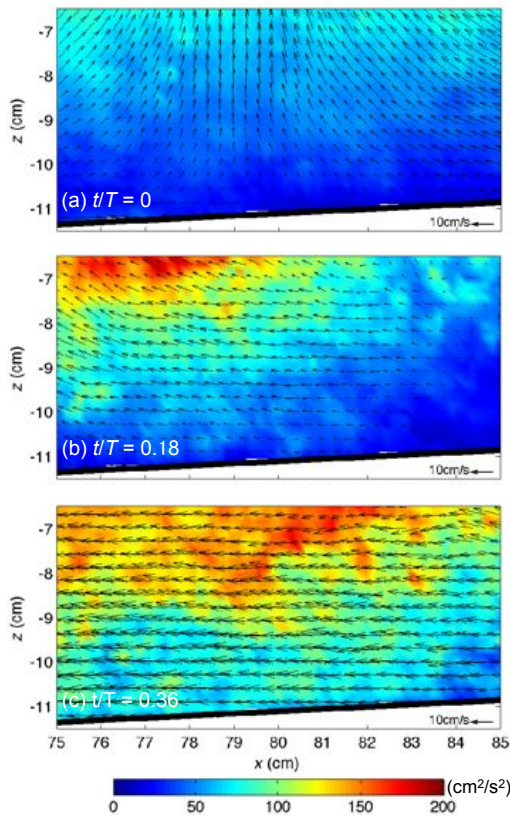


図 8 Case2, $x = 80$ cm (遷移領域) における図 7 と同様の計測結果

効果が大きいことを示唆している。

(3) 砕波乱流場の時空間変動特性

図 7、図 8、図 9 は各ケース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乱れエネルギーの空間分布の時間変化を示している。個々の流速ベクトルは PIV 解析で得られた全 80 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。本章で示す全ての流速は有効データ数 30 個以上でアンサンブル平均した値である。各ケースの遷移領域では砕波クレスト通過後、水平ローラー渦と斜向渦の通過によって生じたと考えられる乱れエネルギーが水面から底面方向に分布する (各図の(b))。その後、戻り流れが発達する位相で比較的強い乱れエネルギーが岸側から輸送される (各図の(c))。この位相で現れる乱れは計測範囲よりも岸側で生じた乱れがその強さを比較的維持したまま戻り流れによって沖側へ輸送されたものと考えられる。その後、岸側からの乱れの輸送はその強さを徐々に弱めながら次の波が来襲する直前まで継続する。戻り流れによって輸送される乱れは底質の巻き上げに寄与する一方、岸側から継続的に輸送される乱れは巻き上がった底質が容易に沈降するのを

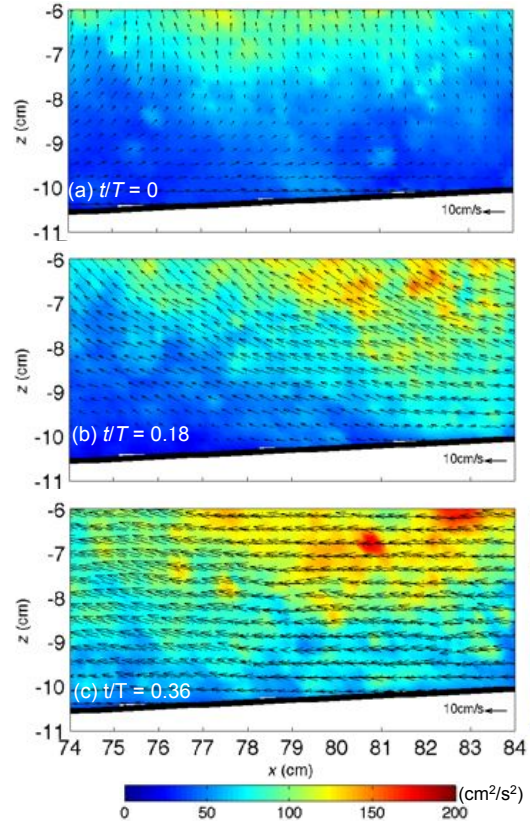


図 9 Case3, $x = 80$ cm (遷移領域) における図-14 と同様の計測結果

抑制し、底質を浮遊砂として広範囲に輸送する役割を担うと推察される。また、Case1 (Spilling)では水面近傍に比較的強い乱れが分布する傾向が強く、Case2 (Spilling-Plunging)と Case3 (Plunging)ではCase1よりもさらに深い領域まで強い乱れが到達する。なお、紙面の都合により図は示さないが、各ケースのボア領域についても同様な解析を行っている。ボア領域においても遷移領域で得られた結果と同様に、砕波クレスト通過後、乱れエネルギーが水面から底面方向に分布し、さらに、戻り流れが卓越する位相において計測範囲よりも岸側から乱れが輸送される。ただし、遷移領域からボア領域に波浪が進行する過程で渦のスケールが減少するため、ボア領域で確認される乱れエネルギーの強さは遷移領域よりも小さい値を示す。

(4) 時間平均の乱れと浮遊砂濃度との関係

図 10、図 11、図 12 はそれぞれ、Case1、Case2、Case3 における(a)浮遊砂濃度、(b)水平・鉛直流速、(c)乱れエネルギーの時間平均値 (3 周期分の時間平均値) の空間分布を示している。ここでは底質の巻き上げに着目するため、流速と乱れエネルギーは底面近傍 ($d = 1$ cm, d : 底面からの距離) の値で評価した。各ケースとも、底面近傍の浮遊砂濃度が高い

位置で乱れエネルギーと沖向きの流速（負の水平流速）が増加する傾向が確認できる。底面近傍の浮遊砂濃度の最大値は Case1 よりも Case2 と Case3 のほうが高い値を示す一方、最大濃度を示す位置の水平・鉛直流速に大きな差は見られない。また、乱れエネルギーは Case1 よりも Case2 と Case3 のほうが高い値を示している。この結果はこれまで説明したように、底質の巻き上げには乱れの影響が強く関与していること、さらに、砕波帯における浮遊砂濃度の推定には乱れエネルギーを陽的に与えた浮遊砂濃度の鉛直フラックスが必要であることを示している。

図 13 は各ケース、各計測位置における底面近傍 ($d/h = 0.05$, h ; 水深) の乱れエネルギーと浮遊砂濃度を求め、両者の関係をプロットしたものである。ややバラツキがあるものの、底面近傍では乱れエネルギーの増加に伴い浮遊砂濃度も増加する傾向が確認できる。なお、浮遊砂濃度は乱れエネルギーの増加とともに上昇を続けるのではなく、最終的に乱れエネルギーによる底質の巻き上げと浮遊砂の沈降が平衡する濃度となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 9 件)

- ① 大塚淳一、渡部靖憲、林倫史、移動床砕波帯の流速場時空間変動と底質輸送に関する実験的研究、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、68 巻、2012、481-485
- ② Junichi Otsuka, Yasunori Watanabe, Wave flume-based evaluation of suspended sand transport in breaking waves, Proceedings of 33rd Conference on Coastal Engineering, 査読有、33 巻、2012、Online
- ③ 大塚淳一、渡部靖憲、砕波帯における浮遊砂速度と浮遊砂フラックスの計測、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、査読有、67 巻、2011、91-95

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① 大塚淳一、移動床砕波帯の流速場時空間変動と底質輸送に関する実験的研究、第 59 回海岸工学講演会、2012 年 11 月、広島県広島市
- ② Junichi Otsuka, Wave flume-based evaluation of suspended sand transport in breaking waves, The 33rd International Conference on Coastal Engineering, 2012 年 7 月、Spain Santander
- ③ 大塚淳一、砕波帯における浮遊砂速度と浮遊砂フラックスの計測、第 58 回海岸工学講演会、2011 年 11 月、岩手県盛岡市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 淳一 (OTSUKA JUNICHI)
独立行政法人土木研究所・研究員
研究者番号：50540556

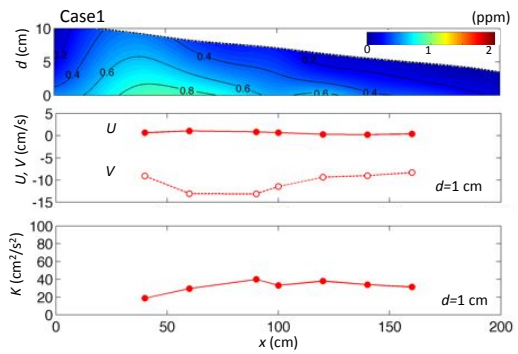


図 10 Case1 における浮遊砂濃度、水平・鉛直速度、乱れエネルギーの時間平均値の空間分布

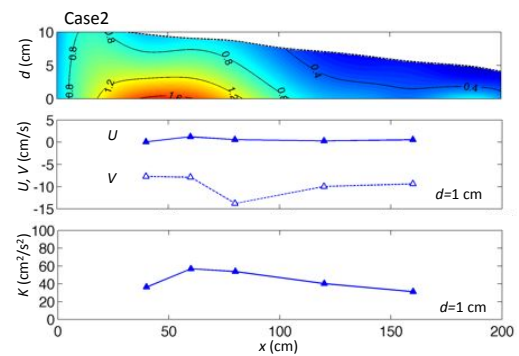


図 11 Case2 における浮遊砂濃度、水平・鉛直速度、乱れエネルギーの時間平均値の空間分布

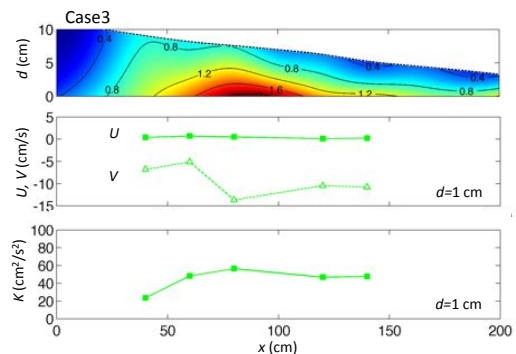


図 12 Case3 における浮遊砂濃度、水平・鉛直速度、乱れエネルギーの時間平均値の空間分布

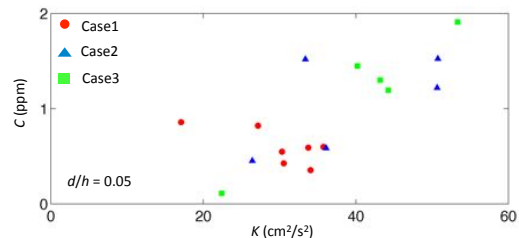


図 13 底面近傍 ($d/h = 0.05$) の乱れエネルギーと浮遊砂濃度の関係 (d ; 底面からの距離, h ; 水深)