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 研究期間:平22~平24 担当チーム:寒冷沿岸域チーム、寒地技術推進室 研究担当者:大塚淳一、菅原吉浩、大井啓司

【要旨】

二次元断面水路において移動床実験を行い,砕波帯における浮遊砂の移動速度と濃度の時空間変動を計測した.浮遊砂の速度と濃度の計測にはそれぞれ Ultrasonic Velocity Profiler (UVP)と光学式濁度計を使用した.波峰通 過時における鉛直速度と水平速度の上昇時および波峰通過後の大規模渦が発達する位相において底面近傍の浮遊 砂濃度が増加する様子が確認された.水平フラックスの時間平均値は戻り流れの影響により沖向きとなり,鉛直 フラックスの時間平均値は砂粒子の沈降の影響により鉛直下向きとなる.波エネルギーフラックスの減衰率から 評価された浮遊砂巻き上げ係数の平均値は 406 であり,現地観測・大規模実験の結果をもとに評価された値より もかなり大きな値となることが明らかとなった.

キーワード:浮遊砂, 砕波, 乱流, 巻き上げ率, Ultrasonic Velocity Profiler (UVP)

1. はじめに

砕波によって底面から大量に巻き上がる浮游砂は沿岸 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. 浮遊砂による地形変化への影響を定量的に評価する ためには砕波帯における底質の輸送・拡散メカニズムを 解明することが不可欠であり、これまで多くの研究者に よって砕波帯の浮遊砂に関する現地観測・室内実験が行 われている(例えば、加藤ら、1983、柴山ら、1985、灘 岡ら、1987).浮遊砂の挙動を正確に把握するためには 浮遊砂の移動速度と濃度から浮遊砂の輸送・拡散を直接 評価する必要がある.しかしながら、砕波帯のような高 濃度の浮遊砂の移動速度を計測することは極めて難しい ため、流速と濃度から浮遊砂の輸送・拡散を評価した研 究例が多く報告されている.一方,近年,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)を浮遊砂速度の計測に適用した例が 報告されており(O'Donoghue ら, 2004), UVP によって 比較的高濃度の浮遊砂の移動速度を計測できることが明 らかとなっている.

本研究では、断面水路内の砕波帯において UVP と光 学式濁度計を用いて浮遊砂の速度と濃度を計測し、浮遊 砂の輸送・拡散過程を詳細に把握する.また、実験結果 から浮遊砂平均濃度と波エネルギーフラックス減衰率お よび浮遊砂巻き上げ係数を計算し、現地観測・大規模実 験のデータから得られた値(合田、2010)と比較する.

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



図-1 計測点における各計測器の配置図

水路の一端に勾配 1/10 の斜面および勾配 1/20 の斜面を 設置して行われた. 汀線から沖側 3.0 m の区間には深さ 10 cm のサンドピットを設置し,細粒分を除去した中央 粒径 0.20 mm の硅砂をピット内に敷き均した状態で造波 した. 計測項目は浮遊砂濃度,浮遊砂速度および水位変 動量であり,それぞれ光学式濁度計,UVP,容量式波高 計を使用して計測を行った.本実験では波高計を造波板 前面から岸側に 5.8 m と 10.6 m離れた位置および浮遊砂 濃度と速度の計測点に設置した. 計測点に設置した濁度 計,UVP,波高計は造波板前面から岸側 10.6 mの位置に 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した. 浮遊砂の水平速 度を計測する際には超音波トランスデューサーを水路内 に水平に設置し,超音波パルスを沖側から計測点に向か

実験 勾配 砕波 Т H_0 H h Surf similarity 形式 ケース parameter (s) (cm) (cm) (cm) Case1 1.1 12.2 11.9 14.0 1/10 S 0.398 Case2 1.4 12.2 14.3 14.0 1/10 S-P 0.462 Case3 2.0 7.5 12.5 10.5 1/10 Р 0.707 12.5 13.8 S 0.247 1.4 9.7 1/20 Case4

表-1 実験条件





 図-2 各実験ケースの計測点 (x; 砕波点からの距離, z; 底 面からの距離, h; 水深, H; 波高)

って照射した.一方,鉛直速度を計測する際には超音波 トランスデューサーを鉛直下向きに設置し,超音波パル スを水面方向から計測点に向かって照射した.図-1 に 計測点における各計測器の配置図を示す. 濁度計は水路 中央に設置し,波高計は濁度計から水路横断方向に 10 cm 離れた位置に設置した.浮遊砂速度を計測する際に は超音波パルスが濁度計と干渉するのを防ぐため,濁度 計センサーと超音波放射軸中心の水平距離が 8 mm とな るように超音波トランスデューサーを設置した.各計測 器のサンプリング周波数は 100 Hz, UVP による速度計 測の空間分解能は 1.48 mm に設定した.

表-1 は実験条件を示している.本実験では Case1 から Case4 の砕波形式がそれぞれ Spilling (S), Spilling-Plunging (S-P, spilling と plungin の中間形式), Plunging (P), Spilling (S)となるように波高,周期を設定した.計測点は図-2 に示すように砕波帯の底面近傍からトラフレベルに設定



 図-3 Casel, x = 40 cm における(a) 水位変動 η, (b) 水平速度 u, (c) 鉛直速度 v, (d) 浮遊砂濃度 c, (e) 水平フラックス cu, (f) 鉛直フラックス cv, (g) 乱れエネルギーk, (h) 濃 度と水平速度の乱れ成分の相関 cu', (i) 濃度と鉛直速度 の乱れ成分の相関 cv' (黒; z=1 cm, グレー; z=3 cm, 点線; z=5 cm, 試行計測 10 回のアンサンブル平均値)

し、各計測点において10回の試行計測を行った.

砕波に伴う混入気泡が濁度計センサー部および超音波 放射軸上を通過する際にはスパイク状の波形が出力され る. このスパイク状波形の除去・補正方法は佐藤ら (1989)の方法を適用した. なお, Casel, x = 60 cm, Case2, x = 40 cm, Case3, x = 40 cm では気泡混入量が極め て多いため計測を行うことができなかった.

本論文では作用波数が少なく、地形変化が比較的小さ い状態で計測された結果について報告する.

3. 実験結果

3. 1浮遊砂の時空間変動特性

図-3は Casel (Spilling), x=40 cm における(a) 水位変動, (b) 水平速度 u, (c) 鉛直速度 v, (d) 浮遊砂濃度 c, (e) 水平 フラックス cu, (f) 鉛直フラックス cv, (g) 乱れエネルギ ーk, (h) 濃度と水平速度の乱れ成分の相関 cu', (i) 濃度 と鉛直速度の乱れ成分の相関 cv'の時間変化を示してい る (試行計測 10 回のアンサンブル平均値). 波峰通過 時の水平および鉛直速度が上昇する時に底面近傍 (z=1 cm) の浮遊砂濃度が増加する. z=3 cm, z=5 cm では底



図→4 Case3, z=1 cmにおける(a) 水位変動 η, (b) 水平速度 u, (c) 鉛直速度 v, (d) 浮遊砂濃度 c, (e) 水平フラックス cu, (f) 鉛直フラックス cv, (g) 乱れエネルギーk, (h) 濃度と水平 速度の乱れ成分の相関 cu', (i) 濃度と鉛直速度の乱れ成分の相関 cu', (i) 濃度と鉛直速度の乱れ成分の相関 cv' (黒; x=0 cm, グレー; x=20 cm, 点線; x=60 cm, 試行計測 10 回のアンサンブル平均値)

面近傍よりも浮遊砂濃度が低く変動量もかなり小さい. 水平・鉛直フラックスは各流速の変動に応じて正負に変 動する.水平フラックスの変動量は底面近傍で最も大き く,鉛直フラックスの変動量は水深による差がほとんど 見られない.ただし,他のケースにおける水深が深い領 域 (x = 0 cm, 20 cm)では,鉛直フラックスの変動量は 水面に近いほど高い値を示すことが確認されている.乱 れエネルギーは各波峰通過時に比較的短時間で増加・減 少し,次の波が来襲するまで値に大きな変化は見られな い. cu'と cv'はともに乱れエネルギーの上昇時に比較的 大きく変動する傾向が見られる.

図-4, 図-5 はそれぞれ Case3 (Plunging), Case4 (Spilling) の *z* = 1 cm における(a) 水位変動*η*, (b) 水平速度 *u*, (c) 鉛 直速度 *v*, (d) 浮遊砂濃度 *c*, (e) 水平フラックス *cu*, (f) 鉛 直フラックス *cv*, (g) 乱れエネルギー*k*, (h) 濃度と水平速 度の乱れ成分の相関 *c'u'*, (i) 濃度と鉛直速度の乱れ成分 の相関 *c'v*の時間変化を示している(試行計測 10 回のア ンサンブル平均値). Case3 (Plunging) の各値は Case4 (Spilling) よりもかなり大きく, 浮遊砂濃度は Case4 の



図-5 Case4, z=1 cm, における(a) 水位変動η, (b) 水平速度 u,
(c) 鉛直速度 v, (d) 浮遊砂濃度 c, (e) 水平フラックス cu,
(f) 鉛直フラックス cv, (g) 乱れエネルギーk, (h) 濃度と水 平速度の乱れ成分の相関 cu', (i) 濃度と鉛直速度の乱れ 成分の相関 cv' (黒; x = 20 cm, グレー; x = 60 cm, 点 線; x=100 cm, 試行計測 10 回のアンサンブル平均値)

10 倍程度となる. また, 砕波形式が同じ Case1 (図-4) と Case4 (図-5) を比較した場合, Surf similarity parameter が大きい Casel のほうが各値とも全体的に高い値を示す ことが確認されている. Case3, z=60 cm (ボア領域) で は、波峰通過時の水平速度が負(沖向き)から正(岸向 き)に変化する位相で浮遊砂濃度が大きく増加する様子 が確認できる(図-4 (d) 点線). 混入気泡の影響により 計測がでなかった x = 40 cm 付近では、底質が大量に浮 遊する様子が目視により確認されている. また, 水平フ ラックスがこの位相において負から正に変化しているこ とから、z=60 cmで確認された高濃度の浮遊砂は、この 位置よりも沖側で大量に巻き上がった浮遊砂が岸方向へ 輸送されたものであると考えられる. また, Case3, z= 60 cm では乱れエネルギー, c'u', c'v'も波峰通過時に大き く変化する. Case4, x=60 cm (遷移領域) では、これま で示した結果と異なり、波峰通過後において浮遊砂濃度 と乱れエネルギーが増加する様子が確認できる(図-4 (d)(g), グレー, t = 24 4 s). この位相では水面から底面 方向に軸をもつ斜向渦が発達することから、ここで確認 された濃度および乱れエネルギーの増加は斜向渦の影響 によるものと推測される.なお、本実験では Case4 を除 き、斜向渦が最も発達すると推測される地点では気泡混 入量が多いため計測は行われていない.渦や乱れの影響 による浮遊砂の巻き上げを評価するためには、今後、こ の地点における濃度と速度を計測可能とすることが必要 といえる.

3. 2 浮遊砂に関する時間平均諸量

図−6, 図−7, 図−8 はそれぞれ Case4 における浮遊砂濃 度と水平・鉛直フラックスの時間平均値を示している. 図−6 中の実線は実験で得られた浮遊砂濃度の鉛直分布 を以下の式で近似したものである.

$$c(z) = c_c \exp(az) \tag{1}$$

ここで, zは底面からの距離, coは底面濃度, aは濃度減 少率を表している. また, 図-8 に示す鉛直フラックス は式(1)で得られた浮遊砂濃度の鉛直分布と実験で得ら れた鉛直方向流速分布の時間平均値の積を計算したもの である. 底面濃度 C_0 は砕波点 (x=0 cm)から x=40 cm (遷 移領域)までは増加傾向となり, x = 40 cm から x = 100cm(ボア領域)までは減少傾向となる(図-6参照). 他のケースにおいても砕波点から遷移領域までは底面濃 度が増加することが確認されている. 水平フラックスは 全計測点において負の値を示しており、1周期の時間平 均値でみると浮遊砂は岸から沖へ輸送されていることが わかる(図-7参照). 岸側から沖側への浮遊砂の輸送 にはトラフレベル以下で発達する戻り流れが大きく寄与 していると考えられる. 鉛直フラックスも全計測点にお いて負の値を示しており、浮遊砂が時間平均的に底面方 向へ輸送されていることがわかる(図-8参照).本実 験条件では、時間平均的な浮遊砂の鉛直運動に対して波 動運動および大規模渦の影響による巻き上げよりも自重 による沈降が寄与していると考えられる.

図-9は Case4 における浮遊砂濃度と水平・鉛直フラッ クスから鉛直方向の拡散係数を計算した結果を示している. 鉛直拡散係数は以下の式から求めた.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\bar{c}u}{cu} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\bar{c}v}{cv} = -v_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} - v_y \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2}$$
(2)

ここで、 *ē*、 *ū*、 *v*はそれぞれ浮遊砂濃度、水平速 度、鉛直速度の時間平均値であり、 *y*, *y*はそれぞれ水 平・鉛直拡散係数を表している. 左辺第 2 項の値は図-7 に示す各水深の水平フラックスを岸沖方向に 3 次スプラ イン関数で補間した値を用いて計算した. 水平方向の濃 度勾配は微少であると仮定し右辺第 1 項を無視すると式 (2)から鉛直拡散係数が求められる. 鉛直拡散係数は *x*=



図-6 Case4 における浮遊砂濃度の時間平均値(黒丸;実験値,実線;近似曲線,C₀;底面濃度,a;濃度減少率)



図-9 Case4における鉛直拡散係数

20 cm(砕波点近傍)で比較的高い値を示し(最大 100 cm²s 程度),岸に近づくにしたがって値は徐々に減少 する. x = 60 cm(遷移領域)からは鉛直拡散係数の水深 ごとの変化が減少する.

3 波エネルギーフラックス減衰率と巻き上げ係数の関係

合田 (2010) は現地観測と大規模実験データをもとに平 均浮遊砂濃度 *C*_{av} (全水深の平均濃度)を以下の式で評 価している.

$$c_{ave} = \frac{\beta_s}{(\rho_s - \rho_w)gw_f h} W_D \tag{3}$$

ここで、 β_s は浮遊砂巻き上げ係数、 W_D は波エネルギ ーフラックスの減衰率、 ρ_s は砂の密度、 ρ_v は水の密度、 gは重力加速度、 w_f は砂の沈降速度、hは水深を表して いる.本節では実験結果をもとに式(3)から浮遊砂の巻 き上げ係数を求め、本実験と現地観測・大規模実験で得 られた浮遊砂の巻き上げ係数の比較を試みる.

図-10は Case1, Case2, Case4 における波高の岸沖分布 を示している. 図中の実線と点線は実験で得られた各地 点の波高を 3 次スプライン関数で補間した結果であり, 波エネルギーフラックスの減衰率はこの結果を用いて計 算される. また, 平均浮遊砂濃度 Case は式(1)を底面から 水面まで積分することにより,以下の式で求めることが できる.

$$c_{ave} = \frac{c_0}{ah} (\exp(ah) - 1) \tag{4}$$

ここで、 c_o は底面濃度、aは濃度減少率、hは水深を表 している. **表**-2 は式(1)をもとに得られた各実験ケース の c_o とaを示しており、平均浮遊砂濃度 C_{ae} はこの表の 値と図-2に示す各地点の水深から求められる.

図-11 は Case1, Case2, Case4 における波エネルギーフ ラックスの減衰率 W_D と浮遊砂平均濃度 c_{ae} の関係を示 している. 波エネルギーフラックスの減衰率の増加に伴 い, 平均浮遊砂濃度が上昇する傾向が確認できる.

図-12は Casel, Case2, Case4 における波エネルギーフ ラックスの減衰率 W_Dと式(3)から計算された浮遊砂巻き 上げ係数β の関係を示している.なお、高速度ビデオカ メラで静水中の砂の沈降過程を撮影し画像を PIV で解析 した結果,沈降速度は 2.48 cm/s であった(水面から水深 20 cm までの平均値).浮遊砂巻き上げ係数β を求める 際にはこの値を沈降速度 W_fとして適用した.各ケース とも波エネルギーフラックスの減少にしたがって浮遊砂 巻き上げ係数が増加傾向を示す.この理由として、合田

(2010)が指摘しているように、波エネルギーフラック スの減少率が小さい領域であっても浮遊砂の移流・拡散 によって浮遊砂平均濃度は大きく減少しないことが考え られる.

図-13 は Casel, Case2, Case4 における浮遊砂巻き上げ 係数 β. の岸沖分布を示している. 各ケースとも岸に近づ くにしたがって浮遊砂巻き上げ係数が増加する傾向が確 認できる. Casel, Case2, Case4 の浮遊砂巻き上げ係数の 平均値はそれぞれ 790, 320, 110 (全平均 406) となる. 一方,合田 (2010) による現地観測と大規模実験データ から得られた浮遊砂巻き上げ係数は 0.005 程度であると 報告されており,小規模実験と現地観測・大規模実験で は浮遊砂巻き上げ係数は大きく異なるといえる.

表-2 底面濃度 C₀(ppm)と濃度減少率 a(cm⁻¹)

ケース名	_	x(cm)					
		0	20	40	60	80	100
Case1	C_0	2.78	4.96	6.57	-	2.49	-
	а	-0.11	-0.10	-0.18	-	-0.15	-
Case2	C_0	4.25	8.45	-	5.78	-	-
	а	-0.06	-0.12	-	-0.13	-	-
Case3	C_0	2.86	9.77	-	-	-	-
	а	-0.29	-0.33	-	-	-	-
Case4	C_0	0.52	0.68	0.90	0.87	0.74	0.57
	а	-0.21	-0.06	-0.07	-0.11	-0.13	-0.11



図-10 Case1, Case2, Case4 における波高Hの岸沖分布



図-11 Casel, Case2, Case4 における波エネルギーフラックス の減衰率 W₀と平均浮遊砂濃度 c_{ar}の関係



図-12 Case1, Case2, Case4 における波エネルギーフラックスの減衰率 Wn と浮遊砂巻き上げ係数 Gの関係



図-13 Case1, Case2, Case4 における浮遊砂巻き上げ係数βの岸 沖分布

4. まとめ

本年度得られた主要な研究成果を以下に示す.

 断面水路内で移動床実験を行い、光学式濁度計と UVP を用いて砕波帯の浮遊砂濃度と浮遊砂速度の鉛 直・岸沖分布を計測した.

2) 波峰通過時に水平・鉛直速度が上昇し、底面近傍で は浮遊砂濃度が増加する.このとき、乱れエネルギーお よび速度と濃度の乱れ成分の相関値も上昇する.

3) 時間平均値でみると水平フラックスは戻り流れの影響によって沖向きとなり、鉛直フラックスは波動運動および乱れによる巻き上げ効果よりも自重による沈降の影響が大きいため鉛直下向きとなる.

4) 本実験結果から合田(2010)が示す浮遊砂巻き上げ 係数を計算した結果,現地観測・大規模実験から得られ た値よりもかなり大きな値を示すことが確認された.

参考文献

加藤一正・田中則男 (1983): 砕波帯内の浮遊砂に関する現地観 測,海岸工学論文集,第30巻, pp.224-228.

合田良美 (2010) : 現地観測・大規模実験データに基づく砕波帯
 内の浮遊砂巻き上げ係数の再評価, ECHO/YG 技術論文
 No. 11 (http://echo.co.jp/comp/paper/paper.htm), 2010 年 4 月 20日, 13p.

佐藤愼司・本間基一・柴山知也 (1989) : 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.

柴山知也・堀川清司 (1985): 砕波による底質の浮遊,海岸工学 論文集,第32巻, pp.302-306.

灘岡和夫・上野成三・五十嵐竜行 (1987) : 砕波帯内における底 面近傍の流体運動特性と浮遊砂について,海岸工学論文集, 第34巻, pp.256-260.

O'Donoghue, T., and S. Wright (2004): Flow tunnel measurements of

velocities and sand flux in oscillatory sheet flow for well-sorted and graded

sands, Coastal Engineering., Vol. 51, pp. 1163-1184.