

砕波帯周辺域での底面せん断力と浮遊砂濃度の関係に関する研究

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN BOTTOM SHEAR FORCE AND SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION AROUND SURF ZONE

鷲見浩一¹・高江俊之²

Hirokazu SUMI and Toshiyuki TAKAE

The relationship between the velocity distribution and the distribution of the suspended sediment concentration inside a wave around the surf zone has not been fully explained. In this study, we studied the time-space distribution of the suspended sediment concentration around the surf zone. Furthermore, we have made observations on the relationship between the velocity distribution and the distribution of the suspended sediment concentration inside a wave. As a result, it has become apparent that the distribution of the suspended sediment concentration was dependent on the flow velocity inside the wave. The suspended sediment concentration is lower during the time period before a wave reaches the breaking point. As a wave approaches the breaking point, the flow velocity at the center of the wave crest becomes greater, the bottom shear force increases, and suspended sediment concentration increases.

1. はじめに

砕波による浮遊漂砂量は掃流漂砂量よりも多量であることから、砕波帯周辺での底質の浮遊現象は、海浜の地形変化を支配する重要な因子である。砕波帯での底質の浮遊に強く影響する底面せん断力については、田中(1987)が波・流れ共存時の底面せん断力の予測法を提案し、スントヨラ(2004)が加速度効果を加味した算定式による底面せん断力と検査流体を気体として非線形波の流速波形を与えた風洞実験により得た底面せん断力との比較検証を行い、底面せん断力には加速度の影響が有意であることが明らかにしている。また、砕波による底質の巻き上げについては、佐藤ら(1989)が一樣斜面上での浮遊砂濃度を光学式濁度計により計測し、砕波による気泡混入の影響を補正した浮遊砂濃度の空間的な分布特性を検討している。浮遊砂濃度の水深方向の分布については、柴山ら(2004)が底質を浮遊させる起動力によって砕波帯内を3つの要素に分割し、各要素における水深方向の浮遊砂濃度の分布を、基準点濃度と拡散係数を用いて定量的に推定する方法を提案している。浮遊砂濃度の平面2次元的な分布については、宇野ら(2002)が均一に砂を敷き詰めた一樣斜面上の砕波帯内において、浮遊砂雲の平面的な分布状況をCT型濁度計を用いた実験により考察している。

このように、底面せん断力や浮遊砂濃度の分布に関しては、多くの研究が行われ、重要な知見が得られている。しかし、これまでに底質の移動に重要な役割を果たす底面せん断力と浮遊砂濃度を同時に計測した実験的研究は

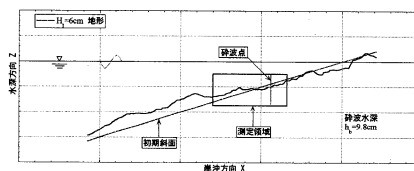
小数である。くわえて、砕波による浮遊砂濃度の分布特性を検討した研究の大部分は、一樣斜面を対象としており、平衡断面に漸近した海浜地形を対象に浮遊砂濃度の時空間分布を実験的に検討した研究も少ない。したがって、平衡断面上での底面せん断力と浮遊砂濃度の分布形態については不明な点が多いのが現状である。

本研究では、平衡断面に漸近した海浜地形を対象に、砕波に伴う底面せん断力と浮遊砂濃度の広範囲な時空間分布を移動床実験により検討する。さらに、底面せん断力と浮遊砂濃度の分布形態を $k-\epsilon$ モデルによる波内部の速度場と関連づけて考究する。

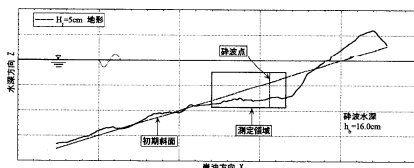
2. 移動床実験と数値計算

(1) 底面せん断力と浮遊砂濃度を検討する実験

実験は、片面ガラス張りの2次元造波水槽(長さ18.0 m, 幅0.7 m, 高さ1.0 m)を用いて行った。水深 $h=40$ cm



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-1 計測範囲

1 正 会 員 博(工) 金沢工業大学准教授 環境・建築学部
環境土木工学科
2 学生会員 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境
土木工学専攻

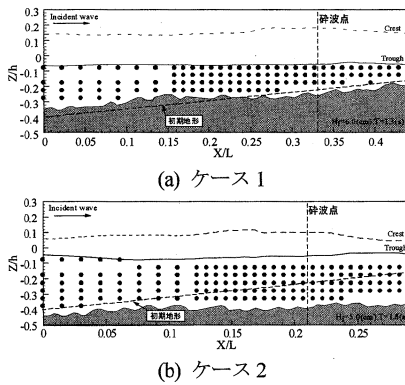


図-2 計測点

の水槽内に、外枠をアクリル板で作成した一様勾配斜面（勾配 $\tan \beta = 1/10$ ）を設置した。実験波は波高 $H_i = 6.0\text{cm}$ 、周期 $T = 1.3\text{s}$ （以降ケース1とする）と $H_i = 5.0\text{cm}$ 、 $T = 1.8\text{s}$ （ケース2）の2種類の規則波とした。砕波形式は、ケース1と2ともに Plunging 砕波であり、砕波水深 h_b は、ケース1が約 9.8cm 、ケース2が約 16.0cm である。底質は、宇野ら（2002）の研究と同じ中央粒径 $d_{50} = 0.3\text{mm}$ のケイ砂を使用し、アクリル製の海底勾配模型の内部全域に敷き詰めた。海浜の平衡断面形状を分類する無次元係数 C は、ケース1で中間型の $C = 5.9$ 、ケース2で堆積型の $C = 3.8$ である。図-1に海浜の縦断面形状と浮遊砂濃度の測定領域を示す。底面せん断力と浮遊砂濃度の測定は、一様斜面上に実験波を24時間造波し、海浜形状が平衡断面に漸近した後に行った。せん断力と浮遊砂濃度の計測には、それぞれ、円柱型（直径 20mm 、高さ 3mm ）の水用せん断力計（SSK 製：S10W-01）と光ファイバー径が 2mm の光学式濁度計（KENEK 製：PMT5-50）を用いた。計測対象波は、造波機の始動から第7波目～第11波目の波とした。測定範囲は、図-2に示すように水深 16cm の静水面を原点として、水平方向は原点から岸側に 95cm 、鉛直方向は波谷レベル以深から砂面の 1cm 上方とした。なお、図中の破線と実線は、それぞれ波峰と波谷のレベルを、黒丸は計測点を示す。計測点の総数は、ケース1の場合で約 170 点となる。底面せん断力は、砂面からせん断力計の計測面まで間隔を約 2mm とし、岸沖方向に濃度と同じ計測点で測定した。底面せん断力の測定と同時に、容量式水位計で水面変動も計測した。せん断力、浮遊砂濃度および水位の値は、造波開始後の第7波目～第11波目までの5波による位相平均値を採用した。

(2) 砕波の数値計算

浮遊した砂の移流・拡散・沈降過程と波の内部流速の関係を検討するには、浮遊砂濃度の計測と同時に流速計測が必要である。しかし、本研究では濃度計測と同時に実験による流速計測が困難であったために、砕波の数値計算を行った。功刀（1997）により考案された MARS 法

は、VOF 法を応用した自由界面の解法である。MARS 法は流体体積率の輸送方程式を Navier-Stokes 方程式と連立させて解く VOF 法の Donor-Acceptor 法に基づく厳密な界面の体積保存に加えて、計算格子内の界面勾配を1次関数として近似する line-segment 関数の導入により、界面形状の正確な捕獲と輸送、および格子界面内での流体率の連続性が考慮可能となった多相流の直接解析手法である。この MARS 法を自由界面の解法として $k-\varepsilon$ モデルによる砕波の数値計算を実施した。実際の数値計算では波条件と計算領域を実験と同じ諸元で設定し、水深データには実験による地形情報を与え、海浜の縦断面形状を考慮した速度場を算定した。なお、紙面の制約上、図示できないが実験と計算による水面変動は、よく一致していた。

3. 底面せん断力と浮遊砂濃度の分布

(1) ケース1の底面せん断力と浮遊砂濃度

砕波帯周辺でのケース1の底面せん断力と浮遊砂濃度の実験結果を図-3に示す。図の左軸は鉛直座標 Z を水深 h で無次元化した Z/h であり、右軸は底面せん断力 τ を水の密度 ρ で除した摩擦速度の2乗の物理量 τ/ρ である。なお、図中の黒丸は τ/ρ 、白丸は水位 η を水深 h で無次元化した η/h 、ハッチ部は海浜の平衡断面形状、破線は造波開始前の初期斜面である。入射波が砕波するときの時刻は、 $t/T = 0.5$ である。また、図-4に $k-\varepsilon$ モデルより算定した波内部の速度場を示す。

図-3(a)は、波頂部が $X/L \cong 0.00$ 付近に到達した時刻の底面せん断力と浮遊砂濃度の空間分布である。波峰中心部より岸側の $0.0 \leq X/L \leq 0.4$ では、約 1g/l の低濃度の砂が浮遊している。水位が静水面以下の $X/L \geq 0.15$ の波前脚部よりも岸側では τ/ρ は小さいが、水位が静水面より高い $X/L < 0.15$ では τ/ρ は大きくなっている。図-3(b)は、図-3(a)から約 0.18s 後の波頂部が $X/L \cong 0.11$ 付近に到達した時刻の底面せん断力と浮遊砂濃度を示している。波峰中心部の $0.05 \leq X/L \leq 0.15$ では、波前脚部から岸側の領域よりも増加し、底面付近で高濃度の砂が浮遊している。図-4(a)に同時刻の流速分布を示す。底面せん断力が増加し、高濃度の砂が浮遊していた領域では、岸方向の比較的大きい約 23cm/s の流速が発生していることが判る。

図-3(c)は、波頂部が $X/L \cong 0.19$ に到達した時刻のせん断力と濃度を示している。図-3(b)の $0.05 \leq X/L \leq 0.15$ で増加していた τ/ρ が、波の伝播に伴って $0.1 \leq X/L \leq 0.18$ の岸方向の領域においても増大している。この τ/ρ の増加に伴って浮遊した砂の高濃度域が図-3(b)と比較して、 $0.14 \leq X/L \leq 0.21$ に移流しながら拡大していることが判る。図-4(b)の $0.14 \leq X/L \leq 0.21$ の底面近傍の比較的大きな岸方向の流速分布により、底面との間にせ

ん断力が発生し、底質を浮遊させることで、浮遊砂濃度が増加し、浮遊した砂が流速分布と同方向に移流したと考えられる。

図-3(d)は、砕波瞬時の時刻の底面せん断力と浮遊砂濃度である。0.21 $\leq X/L \leq 0.31$ の波頂部後方では、 $X/L \leq 0.2$ の波谷よりも底面せん断力が大きく、浮遊砂濃度も高い。また、 $X/L \approx 0.35$ では約7g/lの浮遊砂の高濃度域が発生している。図-3(e)は、砕波瞬時から約0.06s後の時刻の底面せん断力と浮遊砂濃度である。砕波直後においても波頂部後方の $X/L \approx 0.3$ において底面せん断力が最大となり、波峰の中心部で高濃度の浮遊砂の発生域

が維持されている。図-3(f)は、砕波瞬時から約0.48s後の時刻の底面せん断力と浮遊砂濃度である。この時刻において、砕波瞬時と砕波直後に出現していた約5g/lを超える高濃度域は確認できない。砕波後の水位の低下に伴って、底面せん断力と浮遊砂濃度が低下している。同時刻の流速分布を図-4(e)に示す。 $X/L \leq 0.4$ では沖側斜め下方向の流れが発生しており、この沖側斜め下方向の流れにより砕波瞬時に高濃度に浮遊していた砂が着底したものと考えられる。

このように、浮遊砂濃度の時空間分布は、底面せん断力と波内部の流れに依存することが判明した。すなわち、

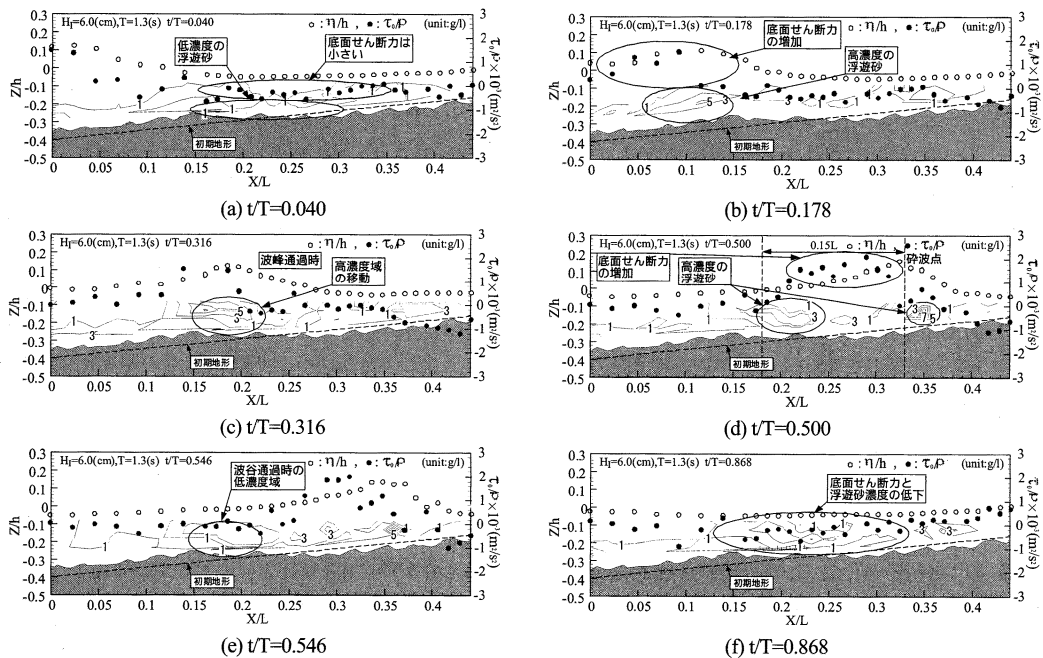


図-3 ケース1の底面せん断力と浮遊砂濃度

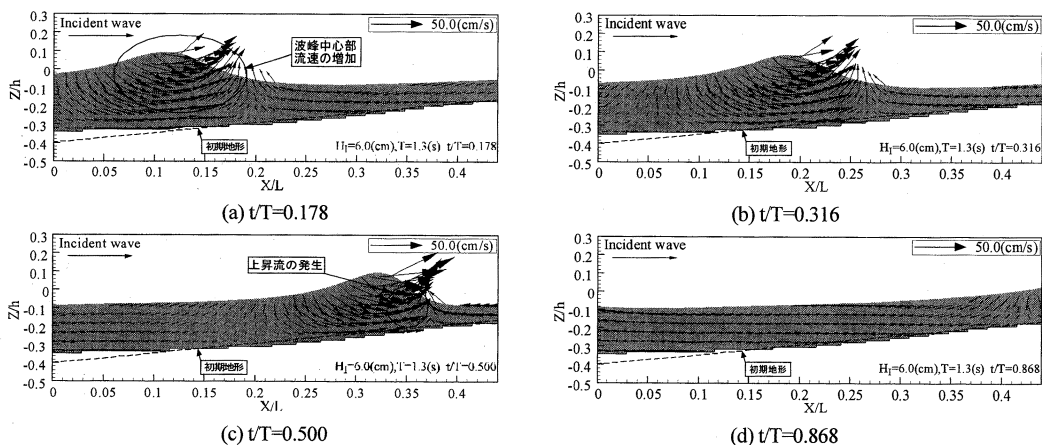


図-4 ケース1の流速分布

波前脚部より岸側で戻り流れが生じている図-3(a)に示す時刻では、 τ_o/ρ は約 $-0.3 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ と小さく、浮遊砂濃度も約 1 g/l と低濃度である。図-4(a)に示す波峰中心部の $0.05 \leq X/L \leq 0.15$ での流速の増加に伴い、同領域の底面せん断力が図-3(b)に図化したように増加し、 5 g/l の高濃度の砂が浮遊する。この高濃度域は、図-4(b)の波峰中心部での流速場と同方向に浮遊砂雲を形成しながら、図-3(c)に示すように $0.15 \leq X/L \leq 0.22$ の範囲に移流・拡大する。その後、図-3(d)に示す碎波時には τ_o/ρ も約 $2.1 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ と最大となり、波前脚部では、図-4(c)の $X/L \cong 0.35$ で生じる上昇流により約 7 g/l の浮遊砂の高濃度域が出現する。碎波後、図-3(f)に示すように τ_o/ρ は小さくなり浮遊砂濃度も低下する。また、 $0.15 \leq X/L \leq 0.22$ の浮遊砂濃度は、波峰通過時にせん断力の増加に伴い高濃度となるが、図-3(e)にあるように波谷通過時にはせん断力が低下し低濃度となる。

(2) ケース2の底面せん断力と浮遊砂濃度

碎波帯周辺域でのケース2の底面せん断力と浮遊砂濃度

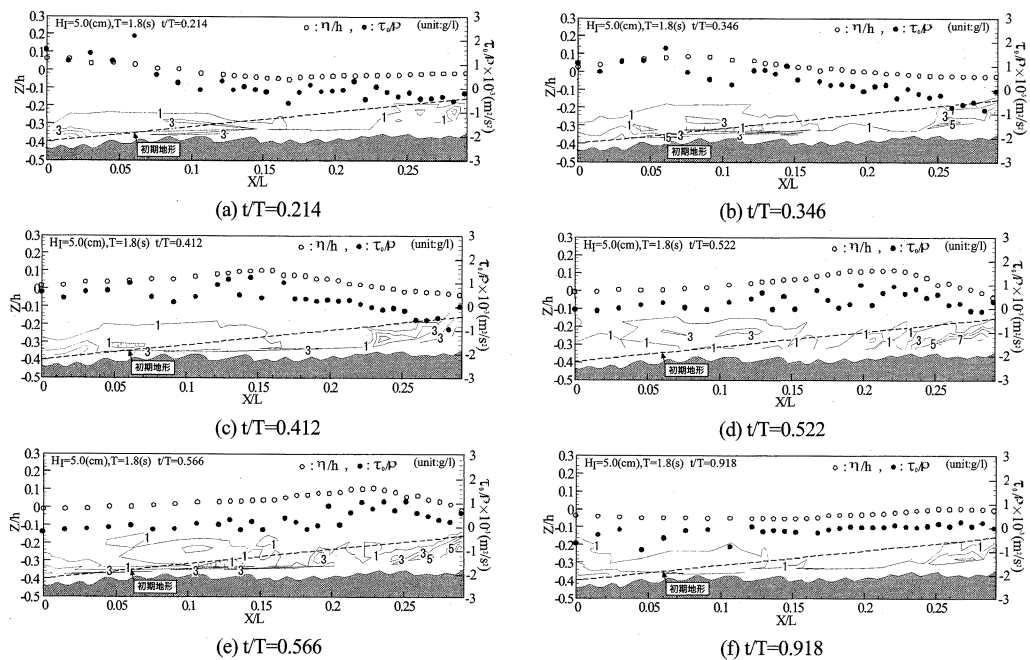


図-5 ケース2の底面せん断力と浮遊砂濃度

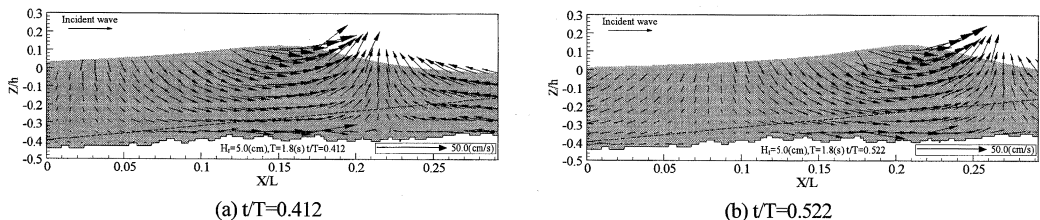


図-6 ケース2の流速分布

の実験結果を図-5に示す。入射波が碎波するときの時刻は $t/T=0.522$ である。また、図-6に $k-\varepsilon$ モデルにより算定した波内部の速度場を示す。

図-5(a)は、波頂部が $X/L \cong 0.0$ に到達した時刻のせん断力と濃度の空間分布である。せん断力は、 $X/L \leq 0.12$ の波前脚部から沖側の領域で $X/L > 0.12$ の波前脚部から岸側の領域よりも大きい。図-5(b)は、波頂部が $X/L \cong 0.08$ に到達した時刻の底面せん断力と浮遊砂濃度である。底面近傍の約 3 g/l の砂の浮遊域は、図-5(a)と比較して岸方向に $X/L \cong 0.16$ まで拡大している。また、約 1 g/l の浮遊砂濃度のコンター線の鉛直方向の上限は図-5(a)では $Z/h \cong -0.25$ であったが、図-5(b)では $Z/h \cong -0.2$ となり、約 1 g/l の砂の浮遊域が上昇していることが判る。図-5(c)は、波頂部が計測領域の $X/L \cong 0.16$ に到達した時刻の底面せん断力と浮遊砂濃度である。 τ_o/ρ が $1 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ を上回る領域は図-5(b)では領域沖側端から $X/L \cong 0.06$ であったが、同時刻では $X/L \cong 0.16$ まで拡大し、底面近傍の浮遊砂濃度が約 3 g/l となる領域も $X/L \cong 0.19$

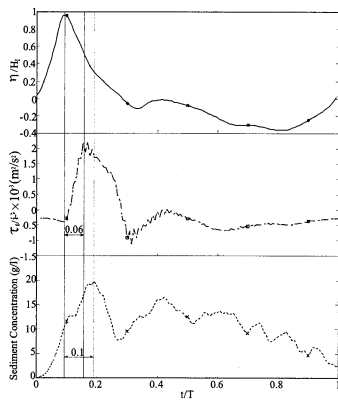


図-7 水位と底面せん断力ならびに浮遊砂濃度の関係

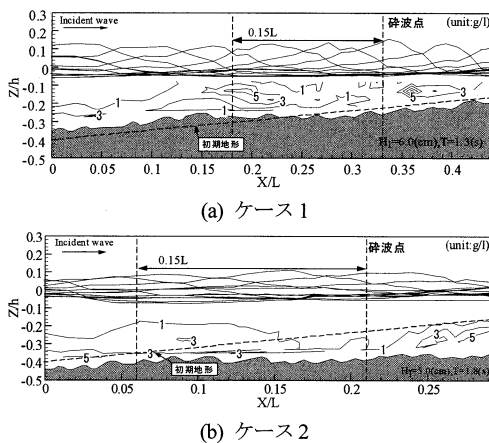


図-8 時間平均した浮遊砂濃度の空間分布

まで広がっている。同時刻の流速分布を示した図-6(a)より、波峰中心部の $0.14 \leq X/L \leq 0.19$ の底面近傍で発生している岸方向の比較的強い流れにより底面せん断力が増加し、底面近傍の約 3g/l の浮遊砂の濃度域が岸方向への拡大したものと推察できる。図-5(d)は、砕波瞬時の底面せん断力と浮遊砂濃度である。波峰中心部から波前脚部にかけての $0.2 \leq X/L \leq 0.29$ では底面周辺で高濃度に浮遊する砂が確認できる。特に、 $X/L \geq 0.24$ では約 5g/l 以上の浮遊砂の高濃度域も出現している。同時刻の流速分布を図-6(b)に示す。 $0.18 \leq X/L \leq 0.25$ の底面付近の岸方向流れは他の領域よりも大きく、同領域の底面せん断力も増大している。また、 $X/L \approx 0.27$ では岸方向の流れと戻り流れが合流して上昇流が発生している。約 5g/l を超える高濃度の浮遊砂域の発生には、岸方向の流れによる底面せん断力の増加と上昇流が支配的であると考えられる。

(3) 水位、底面せん断力および浮遊砂濃度の変動の関係
ケース1における水面変動と底面せん断力、および浮

遊砂濃度の時間波形を図-7に示す。なお、同図は $X/L = 0.21$ での水面変動に伴うせん断力と濃度変化を図示したものである。底面せん断力と浮遊砂濃度の時間変化は、水位変動に同調するように変化し、 τ_0/ρ のピークと浮遊砂濃度のピークは、水位のピークよりも、それぞれ、位相差 $t/T \approx 0.06, 0.1$ の遅れで現れている。これより、水位変動に伴いせん断力が発生し、せん断力の発生が砂の浮遊に影響するという一連の過程が判る。

(4) 時間平均した浮遊砂濃度の空間分布

図-8(a),(b)は、波1周期にわたって時間平均した浮遊砂濃度の空間的な分布を図示したものである。なお、 $Z/h > -0.1$ の実線は、水面波形を時間間隔 $t = 0.08\text{s}$ で図化したものである。同図より、両ケースの計測領域全域において、水面から底面に近づくにつれて、浮遊砂が層状に分布し、底質が移動する底質流動層の存在が確認できる。この底質流動層は、図-3と図-5においても確認できるが、時間平均することにより、砕波点から約 0.15 波長沖側の領域で高濃度となることが判った。

4. おわりに

本研究では、砕波に伴う底面せん断力と浮遊砂濃度の時空間分布を検討した。波峰中心部の底面近傍における岸方向の流速の増大により、せん断力も増加し、同領域の浮遊砂濃度が高濃度になるという一連の過程を確認した。今後、本研究のせん断力の計測結果と田中(1987)によるせん断力の算定式とを比較検証する予定である。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金（若手(B)：鷲見浩一，課題番号：19760347）により行った。謝意を表する。

参考文献

- 宇野喜之・岡安章夫・小林智尚・島谷学(2002)：CT型濁度計による砕波帯内底質巻き上げに関する実験的研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.431-435。
- 功刀資彰(1997)：自由界面を含む多層流の直接数値解析法，日本機械学会論文集B編，第63巻，609号，pp.1576-1584。
- 佐藤慎司・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・M.P.R.Jayarathne(2004)：砕波帯内浮遊砂量の評価法，海岸工学論文集，第51巻，pp.386-390。
- ストヨ・田中仁(2004)：前傾化した波動下での底面せん断力算定法の提案と漂砂量定式化への応用，海岸工学論文集，第51巻，pp.396-400。
- 田中仁(1987)：任意波形を有する波動下での水粒子速度と底面せん断力の算定手法に関する研究，土木学会論文集，第381号/II-7, pp.181-187。