

海浜の平衡縦断面の相違による浮遊砂濃度の 時空間分布に関する研究

TEMPORAL AND SPATIAL DISTRIBUTIONS OF SUSPENDED SEDIMENT
CONCENTRATION IN DIFFERENT EQUILIBRIUM BEACH PROFILES

鷲見浩一¹・兼藤剛²・植松達也³

Hirokazu SUMI, Tsuyoshi KANEFUJI and Tatsuya UEMATSU

¹正会員 博(工) 金沢工業大学助教授 環境土木工学科(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

²正会員 修(工) (株)国土開発センター 技術開発研究所(〒921-0838 石川県白山市八東穂3-7)

³学生員 金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘7-1)

Many researchers have gained key knowledge from existing quantitative measurements of the vertical profiles of suspended sediment concentration in coastal zones. Despite these advances, there still remains much to be solved concerning the distribution of the time and space-dependent concentrations of suspended sediment that accompanies wave-driven transport, as well as the way in which the distribution of suspended sediment concentration varies with the changes in the equilibrium beach profile. This study investigates variations in the temporal and spatial distributions of suspended sediment concentration that induce changes in the equilibrium beach profile. High concentrations of suspended sediment in beach profile Type I and Type II have been recorded in the zone of breaking waves in the ocean half-wavelength region between a bar and trough. The distinction in suspended sediment concentration between Types I and II is clear: suspended sediment concentrations are higher in Type I than in Type II throughout the observed region.

Key Words : *equilibrium beach profile, suspended sediment concentration*

1. はじめに

砕波時の波内部では、波峰前面に水平渦が発生し、波頂部後方には斜降渦が出現する。そして、これらの渦と乱れにより底質が浮遊する。砕波帯内での渦による底質の浮遊現象については、岡安ら¹⁾が底質の浮遊には斜降渦の海底面への到着が支配的であることを実験的に確認し、砕波乱流下においては、渡部ら²⁾が3次元的な底質の巻き上げについて詳細に検討している。また、浮遊砂濃度に関しては、柴山ら^{3),4)}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。このように砕波帯内での底質の浮遊現象については、多くの研究が行われ、浮遊砂濃度の鉛直分布に関しては、重要な知見が得られている。しかし、砕波に伴う浮遊砂濃度の時空間分布を検討した研究や、海浜の平衡断面の相違による浮遊砂濃度の分布特性について考察した研究は少数であり、波の伝播に伴う砕波帯内での浮遊砂濃度の時

空間分布については、不明な点が多い。

本研究は、海浜の平衡断面の相違による浮遊砂濃度の広範囲におよぶ空間分布を、入射波の砕波過程と関連づけて考究するものである。

2. 水理実験

(1) 実験装置と実験方法

本研究では、海浜の平衡断面の相違による浮遊砂濃度の分布特性を考究するために移動床実験を実施した。実験は、図-1に示す金沢工業大学環境土木工学科の片面ガラス張りの2次元造波水槽(長さ18.0m, 幅0.7m, 高さ1.0m)を用いて行った。水深 $h=40\text{cm}$ の水路床上に外枠をアクリル板で作成した勾配 $i=1/10$ の一樣海底勾配(長さ4.8m, 幅0.7m, 高さ0.48m)を設置した。海底勾配の内部にはケイ砂(中央粒径 $d_{50}=0.3\text{mm}$)を敷き詰めた。実験波は波高 $H_f=6.0\text{cm}$, 周期 $T=0.8\text{s}$ と $H_f=8.0\text{cm}$, $T=0.8\text{s}$ の2種類の規則波とした。砕波形式は、それぞれSpilling砕波とPlunging砕波の中間の性質を持つSpilling-Plunging砕波

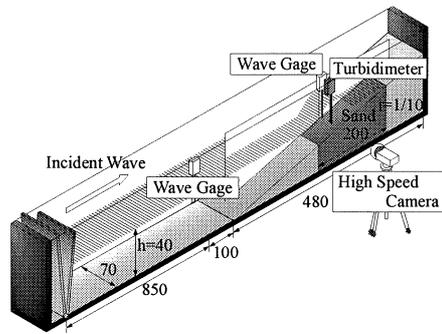
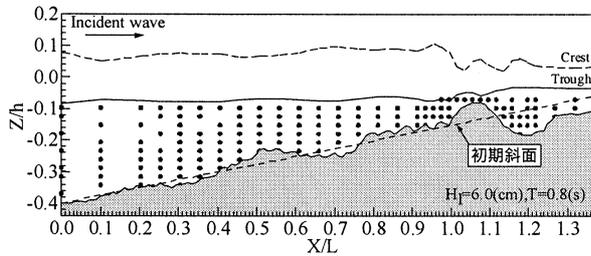
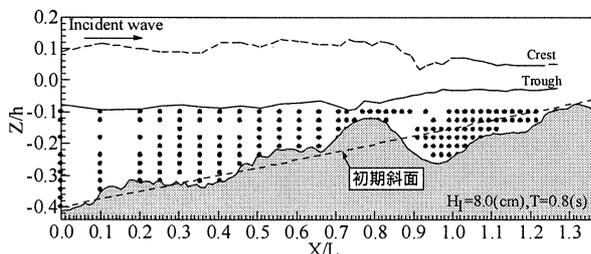


図-1 実験水槽(単位:m)



(a) 中間型



(b) 侵食型

図-2 浮遊砂濃度の計測点

(以下にS-P碎波とする)とSpilling碎波である。堀川ら⁵⁾による海浜の平衡断面形状を分類する無次元係数Cは、S-P碎波で中間型(タイプII)のC=7.4、Spilling碎波で侵食型(タイプI)のC=9.8である。浮遊砂濃度の測定は、一樣斜面に実験波を造波し、海浜形状が平衡断面に漸近した後に行った。浮遊砂濃度の計測には光ファイバー径が $\phi=2\text{mm}$ 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9波目～第13波目の波とし、光学式濁度計により100Hzの時間間隔で濃度のデータを収集した。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135cm、鉛直方向は波谷レベルから砂面の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。計測点の間隔は、岸沖方向の碎波点近傍で2cm、水深方向は1cmとした。このときの計測点の総数は、中間型と侵食型の両平衡断面で約170点となる。また、水路側方に高速度カメラ(デジモ製:VCC-H1000B)を設置して、撮影間隔 $\Delta t=1/250\text{s}$ で浮遊砂の移動状況を記録した。濃度の測定と同時に、

容量式水位計で水面変動も計測した。後述の図-3, 4, 6で用いた浮遊砂濃度と水位の値は、造波開始後の第9波目～第13波目までの5波による位相平均値を採用した。

3. 浮遊砂濃度の時空間分布

(1) 中間型平衡断面

碎波に伴う中間型平衡断面の浮遊砂濃度の空間分布の実験結果を図-3(a)～(h)に示す。図中のハッチ部は海浜の平衡縦断面形状を、破線は造波開始前の初期斜面を、白丸の中心は容量式水位計で計測した水表面の座標を示す。波は、バーの沖側近傍域に到達したときに、水深の急激な減少により碎波する。入射波が碎波するときの時刻は、 $t/T=0.6125$ である。なお、時刻 t は図示領域内の $X/L=0.5$ に計測対象波の波頂が到達した時刻を基準としている。図-3(a)～(h)より、中間型地形での碎波に伴う浮遊砂濃度の空間的な分布特性を確認することができる。

図-3(a)は、トラフから約半波長沖側に存在するくぼみ($0.6 \leq X/L \leq 0.75$, 以下に凹部とする)の沖側地点である $X/L \cong 0.5$ に、波頂が接近した時刻の浮遊砂濃度の空間分布である。バー近傍域においては、約 12g/l の高濃度の浮遊砂が確認できる。 $0.5 \leq X/L \leq 0.6$ の波峰中心部が到達した区域では、底面から約6.4cmの波谷レベルの近傍まで砂が浮遊している。

図-3(b)は凹部に波峰中心部が到達した時刻の浮遊砂濃度を示している。凹部では、波頂部から波峰前面にかけて発生する上昇流により、図-3(a)では約 8g/l であった砂が、より舞い上げられて、約 12g/l と高くなっている。また、 $X/L \leq 0.4$ の比較的水深の深い領域において、濃度は 4g/l 以下と低くなっている。

図-3(b)よりも $t=0.08\text{s}$ 後の浮遊砂濃度分布を図-3(c)に示す。凹部の底面近傍では、バー周辺域と同程度の高い濃度で砂が浮遊している。さらに、凹部の底面近傍で高濃度だった浮遊砂は、波の伝播に伴って、その浮遊領域を波の進行と同方向に拡大していることが確認できる。

図-3(d)では、図-3(c)の $0.68 \leq X/L \leq 0.73$ において約 4g/l であった濃度が、約 8g/l まで大きくなっている。このように、波峰の通過に伴って濃度が高くなることが判る。

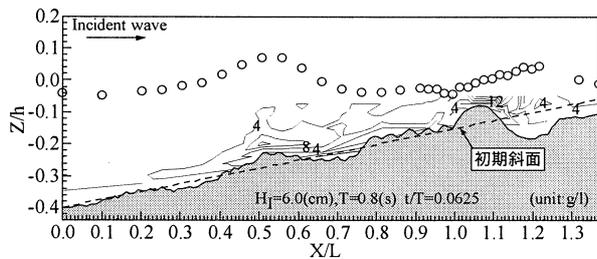
図-3(e)は波峰中心部が凹部とバーの間の区間の $X/L \cong 0.8$ に到達した時刻の濃度分布を示している。 $0.76 \leq X/L \leq 1.0$ の凹部とバーの中間域において、図-3(d)では約 4g/l であった濃度が、約 8g/l となっている。この時刻においても波峰が通過する領域で、濃度が高くなることが確認できる。

図-3(f)は碎波直前の浮遊砂濃度の分布を示している。バー周辺域と凹部の底面周辺では高濃度に浮遊した砂が確認できる。また、バーの岸側斜面($X/L \cong 1.15$, $Z/h \cong -1.16$)においても、高濃度に砂が浮遊している。バー岸側斜面での高濃度域の発生には、波前脚部で生じる戻り流れのバー斜面からの剥離によって出現する渦の巻き上げ現象が寄与しているものと考えられる。

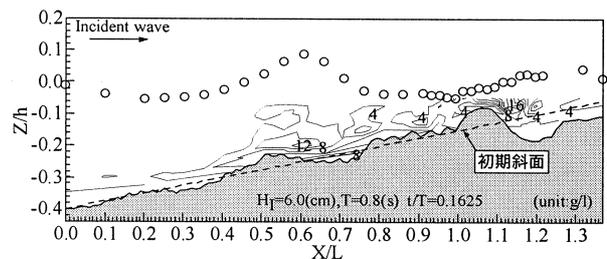
図-3(g)は、波峰前面の勾配が最も急となり、波頂の前後において波形が極めて非対称であり、前述した図の波高と比較して、波高が大きくなっている。また、後述する図-3(h)では波高が減少していることから、同図は砕波時の浮遊砂濃度の空間分布とすることができる。砕波時の浮遊砂濃度は、 $X/L \geq 0.4$ の比較的水深の浅い領域では、凹部の底面周辺とバーの上部、ならびにバーの岸側斜面近傍で約 12g/l の高濃度の砂が浮遊する。バーと凹部の中間の領域の $0.76 \leq X/L \leq 1.0$ においても約 8g/l の底質流動層が確認できる。また、 $X/L \cong 0.6$ では水表面の近くにまで約 4g/l の砂が浮遊している。一方、 $X/L \leq 0.4$ の比較的水深の深い領域では、海底面近傍で約

4g/l 以下の低濃度の掃流漂砂が確認できる。

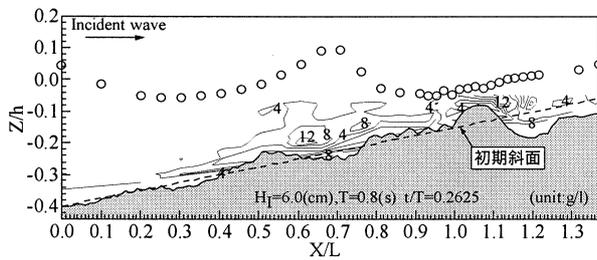
図-3(h)は、砕波後の浮遊砂濃度の空間分布である。バー周辺では砕波瞬間とほぼ同じ約 12g/l の砂が浮遊している一方で、凹部では浮遊砂濃度が砕波瞬間から約 4g/l 減少し、約 8g/l となっている。砕波後の時刻において、計測波の波谷が凹部を通過していることから、波頂部後方で沖側に斜め下方向に発生する流れにより、底質の沈降が促進されたものと考えられる。さらに、トラフの最深域周辺では、約 12g/l の高濃度の浮遊砂域の出現している。このトラフでの高濃域の発生には、バー岸側斜面において斜面の接線方向に岸向きに発生する流れと斜面の間に生じるせん断力の増加、砕波後の流速の変



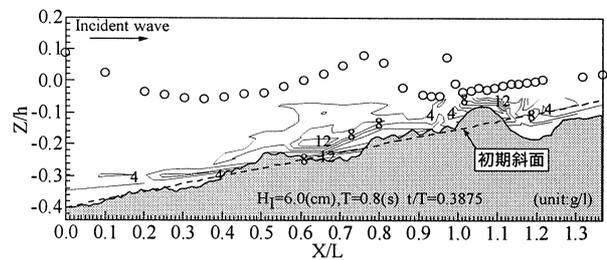
(a) $t/T=0.0625$



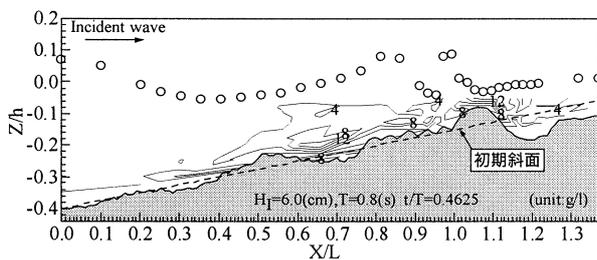
(b) $t/T=0.1625$



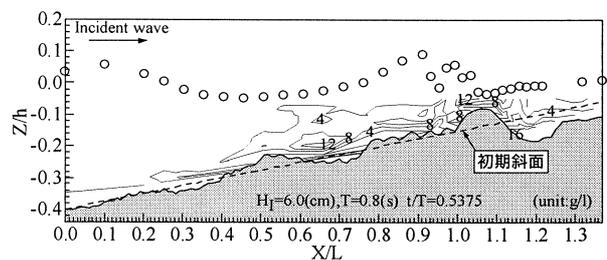
(c) $t/T=0.2625$



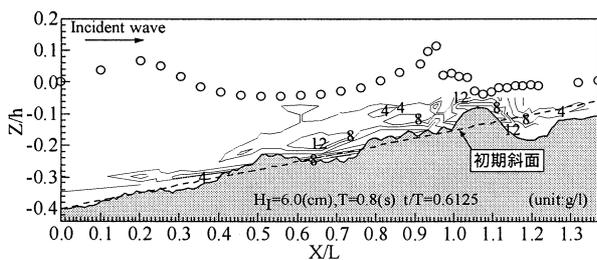
(d) $t/T=0.3875$



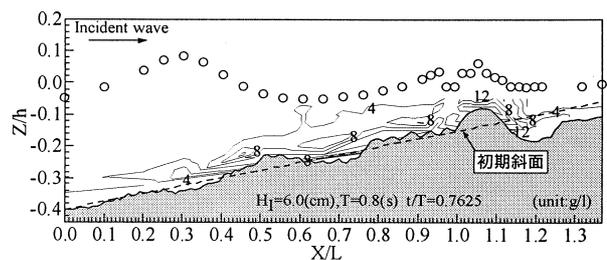
(e) $t/T=0.4625$



(f) $t/T=0.5375$



(g) $t/T=0.6125$



(h) $t/T=0.7625$

図-3 中間型平衡断面における浮遊砂濃度の空間分布

動成分などが寄与しているものと考えられる。

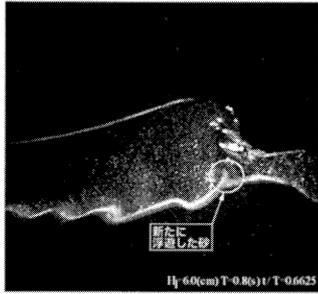


写真-1 バー沖側上端において新たに浮遊する砂

以上のように、図-3(a)~(h)の $0.4 \leq X/L \leq 1.0$ で発生するシートフローの底質流動域においては、入射波の伝播する過程によって、浮遊砂濃度の分布状況が変化することが明かとなった。また、砕波時には写真-1に示すように、バー沖側上端部において新たに高濃度の砂が浮遊する。したがって、底面から水中に砂が供給され、バー近傍域では、波1周期を通じて高濃度の浮遊砂域が維持されることが考えられる。

(2) 侵食型平衡断面

侵食型平衡断面における浮遊砂濃度の空間分布の実験結果を図-4(a)~(h)に示す。図中のハッチ部は海浜の縦

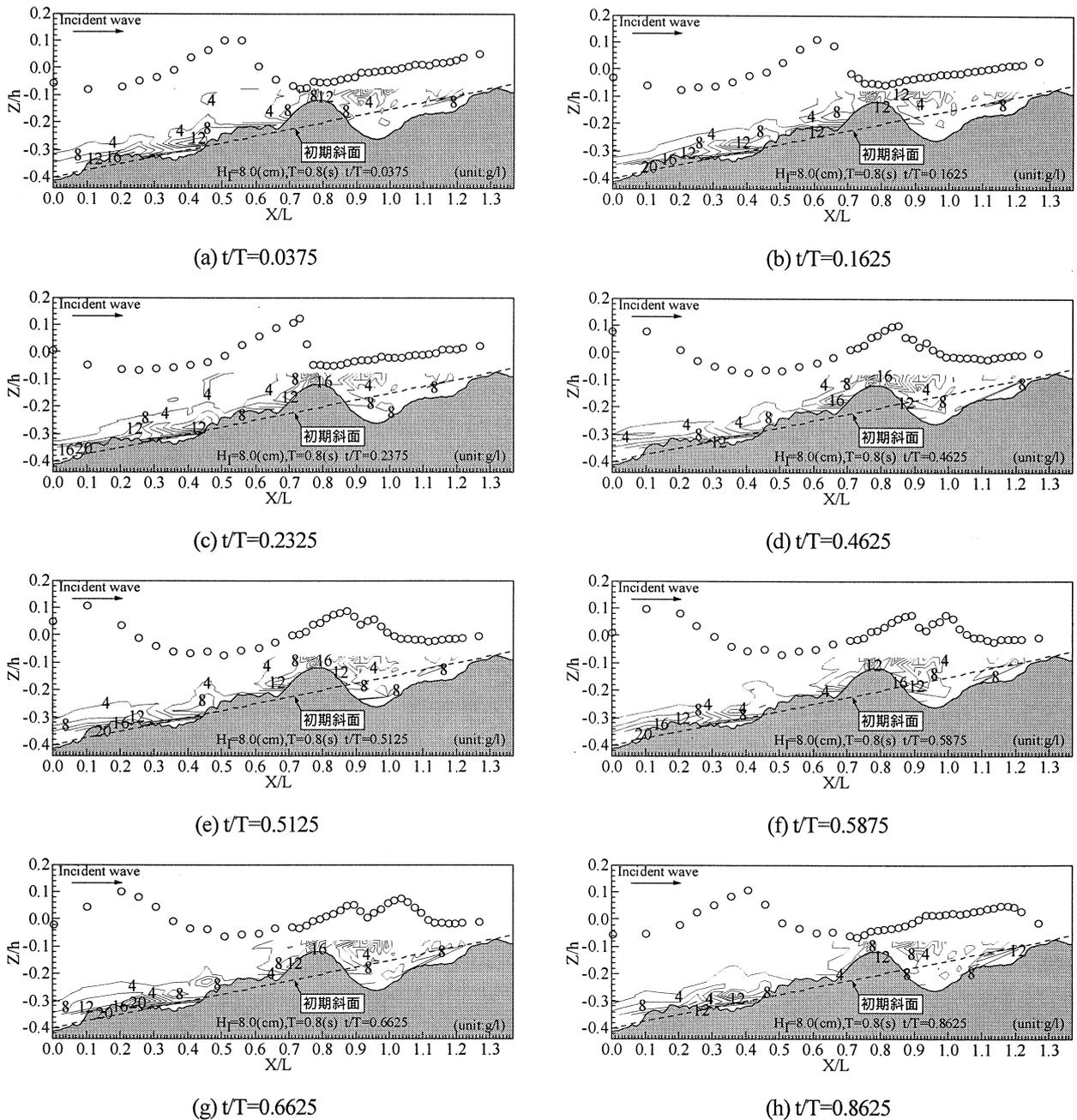


図-4 侵食型平衡断面における浮遊砂濃度の空間分布

断面形状を、破線は造波開始前の初期斜面を、白丸の中心は容量式水位計で計測した水表面の座標をそれぞれ示す。入射波が砕波するときの時刻は、 $t/T=0.2375$ である。なお、時刻は図示領域内の $X/L=0.5$ に計測対象波の波頂が到達した時刻を基準としている。

図-4(a)は $X/L \cong 0.55$ に波峰中心部が接近した時刻の浮遊砂濃度の空間分布である。トラフから約半波長沖側の凹部($0.3 \leq X/L \leq 0.45$)の底面近傍とバー上部にて、約 12g/l の高濃度の浮遊砂が確認できる。また、中間型では $X/L \leq 0.4$ の比較的水深の深い領域においては、海底面近傍で約 4g/l 以下の低濃度の掃流漂砂が発生していたが、侵食型の同領域では、約 12g/l の高濃度の底質流動層が確認できる。

図-4(a)から $t=0.1\text{s}$ 後の濃度分布を図-4(b)に図示する。この時刻において、進行波の波峰中心部は $X/L \cong 0.6$ に到達しており、 $0.5 \leq X/L \leq 0.7$ の領域の濃度を図-4(a)と比較すると、波の伝播に伴って 4g/l よりも大きい濃度域が拡大していることが判る。

図-4(c)は、波峰前面の勾配が最も急となり、波頂の前後で波形が極めて非対称であり、図-4(a),(b)の波高と比較して、波高が大きくなっている。また、後述する図-4(d)では波高が減少していることから、同図は砕波時の浮遊砂濃度の空間分布とすることができる。侵食型においても中間型と同様に、バー周辺域と凹部で高濃度の底質が浮遊している。また、 $X/L \leq 0.4$ の比較的水深の深い領域では、波谷レベル直下に砂の浮遊は認められないが、 $0.63 \leq X/L \leq 0.98$ の領域の波谷レベル直下では 4g/l 以上の底質が浮遊している。

図-4(d)は、砕波直後の浮遊砂濃度の空間分布である。砕波時のトラフ($0.87 \leq X/L \leq 1.0$)における濃度と図-4(d)の同領域の濃度を比較すると、砕波後の方が、濃度の高い領域が広がっている。これは、砕波時にバー近傍で浮遊していた砂が、波の進行によりトラフの領域にまで移流・拡散したものと考えられる。

図-4(e),(f)においても、砕波時のバー近傍での浮遊砂の高濃度域が、波の進行によってトラフの領域で約 12g/l の高濃度を維持しながら拡散し、岸側に移流していることが判る。

図-4(g)では、砕波後の波が、図-4(e),(f)よりも、さらに岸側に伝播し、図-4(e),(f)で確認できたトラフにおける約 12g/l の浮遊砂の高濃度域が消滅している。また、バーと凹部間の領域である $0.5 \leq X/L \leq 0.65$ では、後続波の波谷が通過しているために低濃度となっている。

図-4(h)は、後続波の波頂が、 $X/L \cong 0.4$ の凹部の中心付近に到達した時刻の濃度分布である。同図より、 $0.3 \leq X/L \leq 0.45$ の底面近傍において、図-4(g)では約 8g/l だった濃度が 12g/l まで、波峰の接近により上昇していることが判る。

以上のように、砕波瞬間の浮遊砂濃度の分布は、中間型と侵食型の平衡断面において、バーとトラフから約半波長沖側の凹部(中間型では $0.6 \leq X/L \leq 0.75$ 、侵食型では $0.3 \leq X/L \leq 0.45$)で高濃度の砂が浮遊することが確認でき

た。そして、この浮遊砂の高濃度域は、波の進行と共に移動・拡散することが判明した。

(3) 水面変動と浮遊砂濃度の変化の関係

本節では、シートフロー漂砂の発生する凹部での水面変動と浮遊砂の濃度変化の関係を考究する。中間型平衡断面のトラフより約半波長沖側の凹部($0.6 \leq X/L \leq 0.75$)における、水面変動と浮遊砂濃度の関係を図-5に示す。なお、同図は $X/L=0.7$ での水面変動に伴う濃度変化を図示したものである。図中の実線は水面変動であり、3つの破線は、それぞれ、個別に計測した水深が $Z=-6\text{cm}$ 、 -7cm 、 -8cm での浮遊砂濃度の時間波形である。グラフの

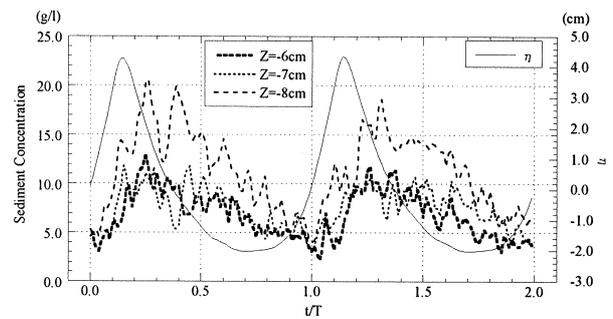
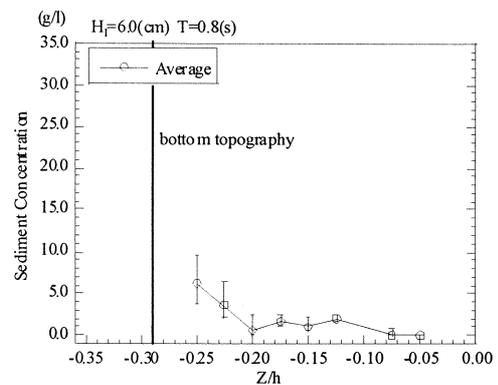
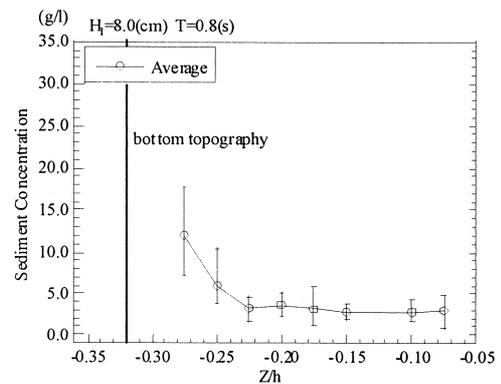


図-5 水面変動と浮遊砂濃度の関係

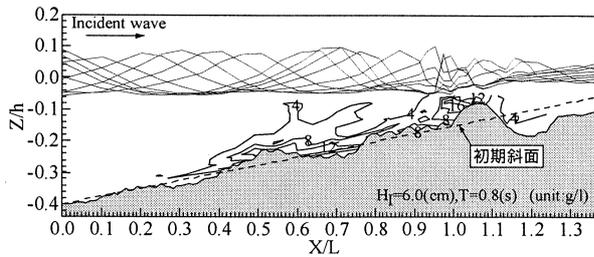


(a) 中間型; $X/L=0.406$

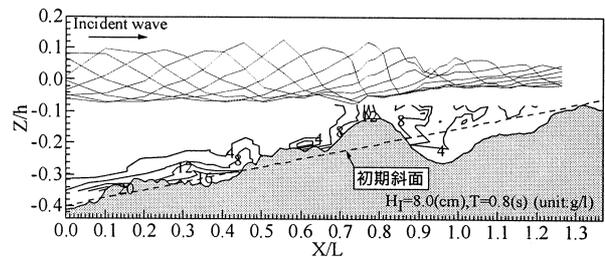


(b) 侵食型; $X/L=0.406$

図-6 浮遊砂濃度の鉛直分布の一例



(a) 中間型



(b) 侵食型

図-7 確率密度が最大となる浮遊砂濃度の空間分布

作成に使用した水位と浮遊砂濃度のデータは、造波開始から第9波目と第10波目のものである。したがって、図-5では、図-3, 4に示した浮遊砂濃度の等値線図のように、水位と濃度のデータについて位相平均は行っていない。グラフより、水位がゼロアップクロス点から上昇し波峰へ向かうと、浮遊砂濃度も高くなっていることが判る。一方、水位が波峰から波谷へ向かって下降すると浮遊砂濃度も低くなる傾向となる。このように、凹部における浮遊砂の濃度は、水面の変動に同調するように変化する。そして、浮遊砂濃度のピークは、水位のピークよりも位相差が $t \cong 0.1$ の遅れで出現することが明かとなった。

4. 平衡断面の相違による浮遊砂濃度

(1) 鉛直方向の濃度分布

図-6(a),(b)に中間型と侵食型の浮遊砂濃度の鉛直分布の一例を示す。なお、エラーバーの上端と下端は、波1周期の浮遊砂濃度の最大値と最小値であり、白丸は、波1周期の浮遊砂濃度の平均値である。図-6(a),(b)は、中間型で掃流漂砂からシートフローへ移行した境界付近の $X/L=0.406$ での浮遊砂濃度の鉛直分布を示している。同図から底面から波谷レベル直下までの領域において、侵食型が中間型よりも高濃度となっていることが判る。この他に、 $X/L=0.202$ の比較的水深の深い地点での鉛直分布、中間型の凹部中心付近の $X/L=0.710$ の鉛直分布などで、いずれも侵食型が中間型よりも、海底面近傍から波谷レベル直下の範囲において浮遊砂濃度が大きくなることが確認できた。

(2) 波1周期にわたる浮遊砂濃度の空間分布

図-7(a),(b)は、各計測点における浮遊砂濃度のデータにおいて、波1周期にわたって確率密度が最大となるときの濃度の値の空間的な分布を、中間型と侵食型について図示したものである。なお、図中のハッチ部は海浜の縦断面形状であり、破線は造波開始前の初期斜面である。また、 $Z/h > -0.1$ の実線は、水面波形を時間間隔 $t=0.125$ で図化したものである。同図より、中間型と侵食型の両平衡断面に共通して、バー周辺域と凹部において浮遊砂の高濃度域が確認できる。また、 $X/L \leq 0.4$ の比較的水深の深い領域では、侵食型では約 $12g/l$ の高濃度の底質流

動層が発生する。

5. 結論

本研究では光学式濁度計を用いた移動床水理実験を実施して、海浜の平衡断面の相違による浮遊砂濃度の広範囲な空間分布を波の進行過程と関連づけて考究した。

以下に本研究で得られた主要な結論を示す。

(1) 碎波瞬時の浮遊砂濃度の分布は、中間型と侵食型の両平衡断面において、バーとトラフから約半波長沖側の凹部(中間型では $0.6 \leq X/L \leq 0.75$ 、侵食型では $0.3 \leq X/L \leq 0.45$)で高濃度の砂が浮遊する。

(2) (1)で示した浮遊砂の高濃度域は、波の進行に伴って移流することが判明した。また、中間型では入射波の前脚部がバー上部に接近したときに碎波が発生し、この時刻において、バー沖側上端部で新たに砂が浮遊した。

(3) 中間型の凹部での浮遊砂濃度は、水位変動に同調するように変化し、濃度のピークは水位のピークよりも位相差 $t \cong 0.1$ の遅れて現れた。

参考文献

- 岡安章夫, 敦賀仁, 松川祐, Nimal Waijyaratna, 片山裕之: 画像解析による斜降渦の特性とその発生分布について, 土木学会, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.141-145, 2000.
- 渡部靖憲, 秀島賢保, 佐伯浩: 碎波乱流下の底質粒子の三次元的挙動及び巻き上げに関する実験的研究, 土木学会, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.446-450, 2003.
- 柴山知也, Winyu Rattanapitikon, 岡安章夫: 碎波帯内の浮遊砂量の算定モデル, 土木学会, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.431-435, 1994.
- 柴山知也, M. P. R. Jayaratne: 碎波帯内浮遊砂量の評価方法, 土木学会, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.451-455, 2003.
- 堀川清司, 砂村継夫, 近藤浩右, 岡田滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 土木学会, 第22回海岸工学講演会論文集, pp.329-333, 1975.