

波打ち帯の底質輸送と海浜地形変化の実験的研究

有 村 盾 一*・服部昌太郎**・内 田 一 裕*

1. はじめに

荒天波浪時に形成される海浜地形を予測するさい、岸側移動境界となる波打ち帯での岸沖方向底質輸送が汀線変化に影響することから、その定量的評価が重要となる。

これまで提案されている二次元海浜変形数値モデルとして、シールズ数で漂砂量を評価した佐藤・Kabiling (1994)、浮遊漂砂量予測を取り入れた柴山ら(1995)、および Boussinesq 方程式を遡上域に拡張して流速場を計算し、漂砂移動モードと海浜の浸透性を考慮した丸尾ら (1995)の研究がある。しかし、現地海浜では、波の打ち上げと打ち下げ時の遡上波モードの変化と表面流出など、遡上波と地形間の複雑な相互作用が存在する。また、遡上波内部流速の測定は困難であるため、掃流力の算定と底質輸送過程も十分解明されていない。したがって、遡上域での流体運動と底質輸送が、海浜変形モデルには十分に考慮されていない。

そこで本研究では、室内移動床実験によりえられた遡上域での水面波形と地形変化の測定結果から、底面せん断応力を考慮した非線形長波方程式に基づき、断面平均内部流速 U と底面せん断力 τ_b を算定する。さらに、遡上波運動と底質移動形式の観測結果と算定流速 U を使用して、佐藤・Kabiling (1994) と丸尾ら (1995) の二次元海浜変形モデルにより、net 漂砂量と海浜地形変化を算定する。以上の計算結果と実験結果との比較検討により、遡上域での dry bed 上の遡上波と底質輸送の運動挙動を解明し、海浜変形モデルの改良点を明らかにする。

2. 実験装置と測定方法

2.1 実験装置

フラップ式造波装置を備える二次元波動水槽 (0.30 m×0.46 m×16 m) 内の 1/20 固定斜面上に、中央粒径 (d_{50}) 0.2 mm (比重 $S=2.7$ 、沈降速度 $W_s=2.86$ cm/s) の自然砂を用いて形成した初期勾配 $\tan \alpha_0=1/7$ の模型海浜に、規則波を入射させて実験を行った (図-1)。実験条件を表-1 に示す。

表-1 実験条件

実験	H_i (cm)	T (s)	H_i/L	$\tan \alpha_0$	海浜区分	測定時間
1	8.0	1.0	0.051	1/7	侵食性	実験開始 60 分後
2	5.4	1.0	0.035	1/7	侵食性	60 分後
3	4.0	1.0	0.026	1/7	中間性	15 分後

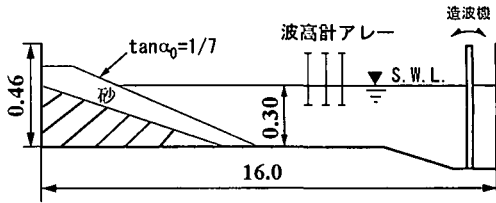


図-1 実験装置の配置概略図 (単位: m)

2.2 測定方法

入射波高は、一様水深部 ($h=0.30$ m) に設置した 3 台の分圧式波高計アレーの検出データを入反射分離して算出した。また、遡上域の縦断地形および水面形の時空間変動は、高速ビデオ画像記録 (200 コマ/s) から、水槽側壁に設置した 1 cm 正方格子を使用して読みとった。

移動床実験により遡上域での底質輸送を定量的に評価するには、遡上波動場の内部流速を適切に測定することが不可欠である。しかし、模型移動床実験では、遡上波動場の計器測定は非常に困難である (Roose・Battjes, 1976)。そこで本研究では、高速ビデオ画像記録よりえられた入射波 5 波平均の水面変動記録から 1/20 周期ごとの位相平均形状を決定し、空間格子間隔を $\Delta x=0.5$ cm として差分化した連続式から線流量 q を算出した (郷農ら, 1995)。dry bed 上の遡上はシートフローとなるため、底質移動層厚を考慮した水深により、線流量から断面平均流速を算定する必要がある。そこで、静水汀線付近での目視計測した底質移動層厚さ δ が岸方向へ線形減少すると仮定し、有効水深を $h_e=h+\delta$ として断面平均流速 U を算出した。

* 学生会員 中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻
** 正 会 員 工 師 中央大学理工学部土木工学科 教授

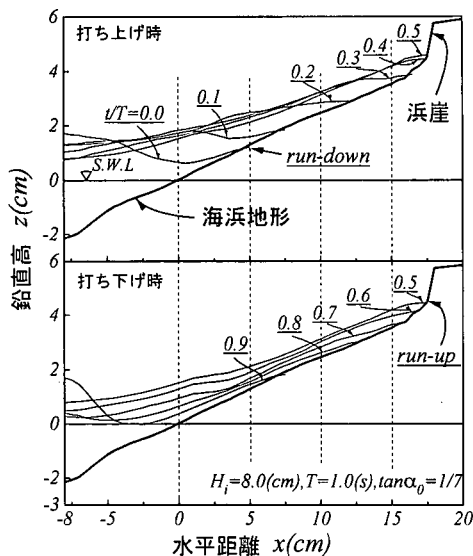


図-2 遡上波の位相平均水面波形 (実験1)
(実験開始 60 分後)

3. 遡上域の水面波形と底質輸送

3.1 遡上域の水面波形と底質輸送形態

図-2 (実験1) は、流速計算に用いた代表的な位相平均水面形状を、打ち上げ開始時を基準として入射波の $1/10$ 位相ごとに、打ち上げ期と打ち下げ期に分けて示したものである。実験開始直後は、地形変化と共に水面波形も大きく変動するため、遡上運動場が比較的安定した実験開始 60 分後のデータを用いたもので、図中には、run-up と run-down の位置が矢印で示されている。

打ち上げ時の $t/T = 0.1 \sim 0.2$ 間で、平均汀線付近にある遡上波面形状に、いわゆる段波モードから遡上モードへの移行による大きな変化が見られる。また、一様斜面への遡上と異なり、最大打ち上げ地点での水面形 ($t/T = 0.5$) には、遡上波が浜崖に衝突する様子が見られる。これに対して、打ち下げ時では、遡上域の水面波形が、ほぼ並行に下降する様子が捉えられている。

以上のような、遡上波の打ち上げと打ち下げモードの変化に対応して、底質輸送形態も大きく異なる。その状況を模式的に描いたものが図-3 である。

段波状進行波が dry bed 上に到達すると、打ち上げ波先端部では底質が巻き上げられるため、掃流移動に比べて浮遊移動が卓越し岸側へ輸送され(①~③)、遡上域上部に沈降する(④)。打ち下げ時での底質移動形式は掃流移動が卓越する(⑤~⑥)。また、打ち下げ波面の通過後に出現する dry bed 上では、地下水の表面流出が長期にわたって継続し、打ち上げ波が再到達するまで冲向きの底質輸送が持続する(⑦~⑧)。この底質移動により、遡

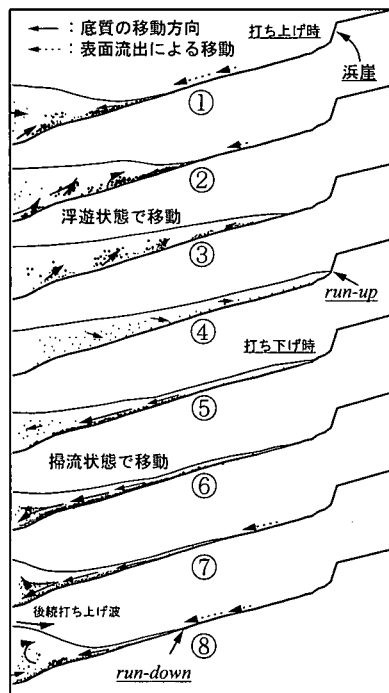


図-3 底質移動形態の模式図

上斜面が平滑化される。

3.2 実験海浜地形の変形過程

各実験での地形変形過程の特徴を以下に述べる。入射波高が最大である実験-1 (図-2) では、浜崖が形成され、時間経過とともに、浜崖地形の特徴である「くの字型」地形がほぼ平行に後退し、浜崖高さの増大により、間欠的に崩壊土砂が遡上域に供給される(郷農ら, 1995)。実験-2 では、実験開始 60 分後までは浜崖は出現しないが、120 分後には鉛直面を持つ浜崖が形成された。入射波高が小さい実験-3 の地形変形速度は、実験-1 と 2 に較べて穏やかであることから、実験-3 では実験初期 ($t = 15$ min) で比較的安定した水面形状を測得することができた。この時点では浜崖は形成されておらず、打ち上げ波先端部で巻き上げられた底質が岸側へ輸送され、波打ち帯上部に堆積することが確認された。

4. 遡上域の断面平均内部流速

図-4 (実験-1) は、断面平均流速 U の時間変化(●)と底面せん断力 τ_b (+) の時間変化を、静水汀線位置 ($x = 0$ cm)、run-down 位置 ($x = 5$ cm)、平均汀線付近 ($x = 10$ cm) および遡上先端付近 ($x = 15$ cm) の 4 地点に対して示したものである。時間軸の基準は、静水汀線を遡上波が通過する時刻とした。図中には、算定流速との比較としてトレーサー追跡によるラグランジュ的流速測定値(▲)と、流速の岸冲方向転換位相(波線)が示されてい

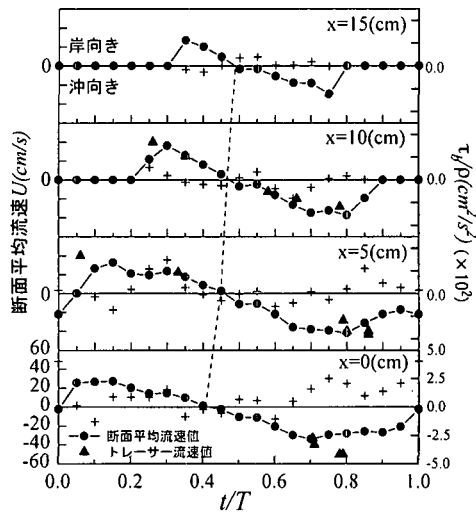


図-4 断面平均流速の算定結果 (実験1)

る。

算定流速の時間波形は、岸向きと沖向き流速の非対称性を捉えている。打ち上げ時には、段波状の進行波が静水汀線を通過後、平均汀線 ($x=5\text{ cm}$) に向けて岸向き流速が増大している。これは、図-2の水面波形変動と同様に、平均汀線を境に遡上波が段波からシートフローへ遷移する遡上モード変化の特徴を示す。また、流向転換位相が場所的に異なるため、打ち上げ波先端部では岸向き流速であるが、静水汀線付近では沖向き流速となる特徴を捉えている。

断面平均流速 U とトレーサー流速との比較から、run-down 地点から岸側では両者の一致度は良いが、run-down 地点から沖側ではトレーサー流速が U に比べて大きい。これは、dry bed 上での流体運動に対して、run-down 地点から沖側では戻り流れと段波状進行波との衝突で形成される回転流速場によるもので、これにより底質が巻き上げ浮遊し、遡上波により岸向きに輸送される (図-3 ⑧)。

底面せん断力 τ_b と平均流速 U の時間変化間に良好な整合性が認められる。特に流向転換時には、 U との間の位相のずれも検出されている。以上のことから、水面変動データに基づく U と τ_b の算定結果は基本的には妥当であると認められるが、遡上段波通過にともなう波面とその後背域での乱れによる運動量拡散などの効果が、 τ_b に包含されるなど、算定法に問題がある。

次に、平均流速 U と τ_b の算定結果を使用して、佐藤らと Dibajnia らの数値モデルにより、net 漂砂量と海浜地形変化の計算を試みる。

5. 遡上域の海浜地形変化

断面2次元海浜変形計算を精度良く行うためには、碎波帯外から波打ち帯にかけての波動場数値計算、岸沖漂砂量則、底質量保存則にもとづく局所漂砂量地形変形モデルなどの精度向上が不可欠である。特に波打ち帯の波動場計算については、岸側移動境界である、遡上振幅運動を数値計算に取り入れた研究 (例えば、Kobayashi・Wurjanto, 1989) があるが、遡上高の算定以外は、問題が残されている。そこで、実験に基づく断面平均内部流速場から、瞬間底面摩擦係数 $f_e(t)$ と海浜地形変化の算定を試みることにし、実験とモデルとの相違点を把握する。

5.1 瞬間底面摩擦係数 $f_e(t)$

底面せん断力の算定には、底面摩擦係数 f_w を適切に評価する必要がある。しかし、遡上域 dry bed 上での摩擦係数に関する研究は非常に少ない (例えば、小川・首藤, 1982)。数値計算では、遡上域では Jonsson の底面摩擦係数 (1966) として $f_w=0.01\sim0.03$ が採用され、また上限値は $f_w=0.25\sim0.30$ 程度とみなされている (Nielsen, 1992)。

遡上波動場 ($x=8\sim17\text{ cm}$) での、瞬間底面せん断力 $\tau_b(t)$ の算定結果より、式(1)により $f_e(t)$ を評価すると、 f_e は f_w より大きいことが予想される。

$$f_e(t) = 2(\tau_b(t)/\rho)/(|U(t)| |U(t)|) \dots\dots\dots (1)$$

図-5は、 f_e と $(U/\omega)/d_{50}$ (ω : 入射波の各周波数) との関係を示したもので、 U が小さい流向転換位相時の f_e が大きく評価されている。また、乱れなど底面せん断力以外の効果も、 τ_b の算定に含まれていることから、静水汀線付近 ($x=8\sim12\text{ cm}$) の f_e が過大に評価される原因となっている。

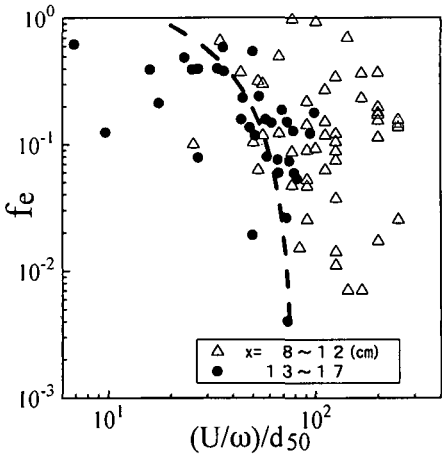


図-5 f_e と $(U/\omega)/d_{50}$ との関係

第一近似として、遡上域の断面平均流速が正弦的に変化する場合には、 $U/\omega \sim A \cos \omega t$ (A : 水粒子の移動振幅) となる。したがって、遡上流速場に対応して f_e も時間的に変化する。図-5 中の太破線は、遡上域上部 ($x = 13 \sim 17$ cm) での f_e に着目して、その時間的変動を示したものである。

5.2 波打ち帯の海浜地形変化計算

図-6～8 に、断面平均流速の時空間変動を用いて、掃流移動のみを考慮した佐藤・Kabiling のモデル (1994) (点線) とシートフロー下の漂砂移動を組み込んだ Dibajnia ら (1992) (破線: 地形補正無し) のモデルによる、岸沖漂砂量 q_{net} と 5 分後の海浜地形の計算結果を実測地形 (実線) との比較で示す。なお、モデル計算では $f_w = 0.03$ を用い、また、 q_{net} 漂砂量分布には、平滑操作がなされている。

実験-1 (図-6) の実験初期段階では、海浜地形が急速に変化するため、遡上運動場が安定する実験開始 60 分

後のデータを採用した。この地形条件では、浜崖の崩壊土砂が間欠的に海浜に供給されている。両モデルの net 漂砂量算定結果は全遡上域で沖向きの底質移動、海浜地形は遡上振幅域で侵食、run-down 地点から沖側で堆積する変形を示す。しかし、実験開始 120 分後の実測地形に比べると、浜崖崩落土砂の供給を考慮しても、モデルは地形変化を過大に算定しているといえる。

実験-2 (図-7) は、浜崖が未発達な海浜地形を対象としたものである。図-3 の模式図に見られるように、打ち上げ時での底質移動形式は浮遊移動、打ち下げ時では掃流移動が卓越する。したがって、佐藤の掃流モデルでは、打ち下げ時での底質移動により遡上振幅域が侵食される。これに対して、Dibajnia らのモデルは浮遊形式の底質移動が考慮されていることから、静水汀線付近で巻き上げられた浮遊砂により、遡上域上部が堆積傾向となる。両モデルの net の漂砂量はほぼ同程度であるが、底質移動形式の違いを反映して地形変化の計算結果が、互いに逆の結果となった。

実験開始 15 分後の、比較的地形変形速度が大きい期間で地形と水面形の時空間データを測得することが出来た入射波高が小さい実験-3 (図-8) では、佐藤のモデルと Dibajnia のモデルとも、平均汀線より岸側遡上域で侵食する地形変形の傾向が見られる。

入射波条件と地形変動算定時での遡上波特性によって、算定地形の形状が異なることは当然の帰結と考えられるが、この確認を実験とモデル計算によって行う必要がある。

図-6～8 の実験と計算モデルとの比較結果に見られるように、モデルの計算に使用した底面摩擦係数は $f_w = 0.03$ と実験からの算定値に較べて小さいにも関わらず (図-5)、実験に較べて計算モデルによる net 漂砂量が過大であり、また空間変化も大きい。この原因として、水

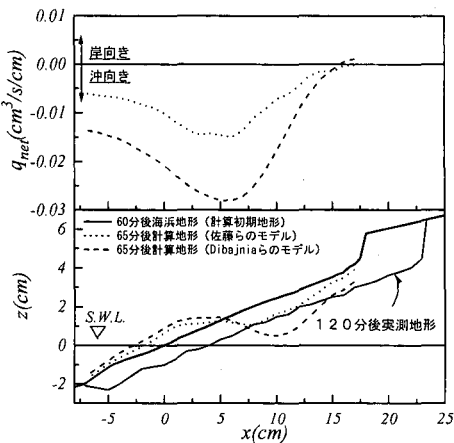


図-6 海浜地形変化の計算結果と実測値 (実験 1)

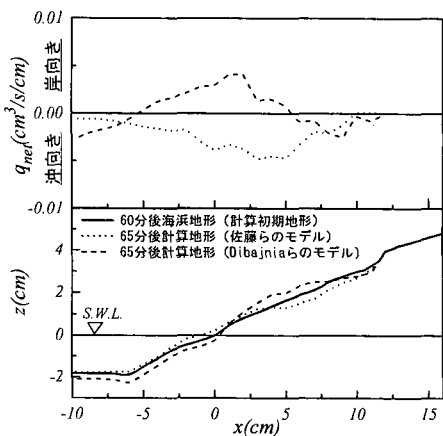


図-7 海浜地形変化の計算結果と実測値 (実験 2)

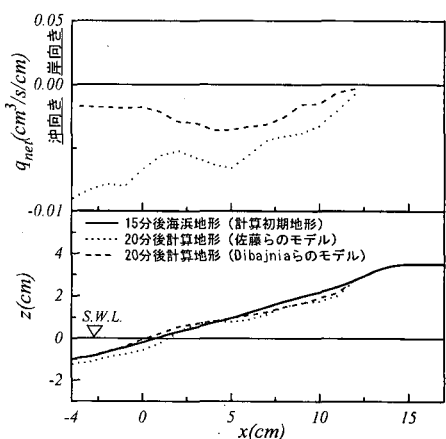


図-8 海浜地形変化の計算結果と実測値 (実験 3)

面変動から算定した断面平均流速が、実験での底面流速より過大であり、それを使用してモデル計算を行ったことが挙げられる。

佐藤のモデルだけでなく、Dibajniaのモデルでも底面摩擦係数 f_w が浮遊砂の舞い上がり強度の判定パラメータに、シールズ数として取り込まれている。したがって、遡上域での f_w を適切に評価することが非常に重要となる。

断面平均流速の算定値は比較的妥当なものであると認められたが(図-4)、水面形状の測定の間隔・空間間隔が粗いため、モデルによる漂砂量算定値のばらつきに施した平滑化が地形変化に影響したことも考えられる。水面波形の変動が小さい実験-3(図-8)では、比較的妥当な計算地形をえている。また、遡上振幅域で見られる、透過地下水のdry-bedへの表面流出による底質輸送で、海浜地形が平滑化されること考慮する必要がある。

6. おわりに

規則波による二次元移動床実験を行い、遡上域での底質輸送形態の把握と断面平均内部流速の算定を試み、海浜地形変形モデルと実験地形との比較検討を行った。本研究でえられた、主要な事柄を以下に記す。

1. 水面波形変動と断面平均流速 U から、平均汀線に境に、段波からシートフローへの遡上モード変化を捉えることができた。また、トレーサー流速との比較から流速算定法の妥当性が確認され、流速波形の非対称性と、打ち上げ波先端部と静水汀線付近とで岸沖の流速方向が異なる特徴を捉えた。

2. 打ち上げ時では底質の巻き上げによる浮遊砂が卓越し、打ち下げ時のdry-bed上の表面流出に伴う底質輸送が、遡上斜面の平滑化をもたらす遡上域の底質輸送形態の特徴が確認された。

3. 底面摩擦力を考慮した非線形長波方程式から τ_b の評価を試み、さらに瞬間底面摩擦係数 $f_b(t)$ を推定した結果、底面せん断力以外の効果を含む問題はあが、妥当な結果をえることができた。

また、瞬間底面摩擦係数 $f_b(t)$ は、遡上流速場に対応して時間的にも変化することが明らかとなった。

4. 比較の対象とした海浜地形変形モデルによるnet漂砂量は、実測値に比べて過大であり、またモデルによる違いも認められた。また、地下水の表面流出に伴う底質輸送による斜面平滑化と、遡上域での摩擦係数 f_w と底面流速の評価が重要である。

謝辞：本研究の実験と資料整理とに熱心に協力した、土木工学科学生松山孝幸と佐藤充弘の両君に謝意を表す。また、本研究は、平成7年度文部省科学研究費補助金(一般研究C, 研究代表者 服部昌太郎)によって行った。

参考文献

- 小川由信・首藤伸夫 (1982): 波打帯の水理特性について, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 135-139.
- 佐藤慎司・M. Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第41巻(1), pp. 401-405.
- 柴山知也・W. Rattanapitikon・岡安章夫 (1995): 浮遊漂砂量予測を取り入れた二次元海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第42巻(1), pp. 446-450.
- 郷農一之・有村盾一・服部昌太郎 (1995): 浜崖地形の形成機構, 海岸工学論文集, 第42巻(1), pp. 616-620.
- Dibajnia, M.・清水琢三・渡辺 晃 (1992): シートフロー状態が卓越する海岸における縦断地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 301-305.
- 丸尾 剛・M. Dibajnia・渡辺 晃 (1995): 遡上域に拡張したブシネスク方程式と漂砂量式を用いた海浜断面変形モデル, 海岸工学論文集, 第42巻(1), pp. 611-615.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layer and friction factors, Proc. 10th ICCE, pp. 127-148.
- Kobayashi, M., and A. Wurjanto (1989): Numerical model for design of impermeable coastal structures, Research Rept. No. CE-89-75, Ocean Engrg. Program, Univ. of Delaware, Newark, Delaware.
- Nielsen, P (1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, Advanced Series on ocean eng, Vol. 4, World Scientific, pp. 23-27.
- Roose, A. and J. A. Battjes (1976): Characteristics of flow in run-up of periodic waves, Proc. 15th ICCE, pp. 108-112.