

斜面上で碎波する波群による漂砂

佐藤 慎司*・浅野 学**・上野慎一郎***

1. 序 論

不規則波による砂移動機構を解明するためには、個々の波の碎波点の変動や長周期波が底質移動に及ぼす影響を明らかにする必要がある。しかし現実の不規則波では、様々な要素が複雑に重合しており、個々の要素のモデル化が困難である。佐藤ら(1991)は、波高の変動とそれに付随する長周期波が砂移動に与える影響を明らかにすることを目的として、一定水深領域を進行する波群を用いて基礎実験を行った。そして、浮遊砂が卓越する条件では規則波と波群で砂の輸送方向が逆転することを示し、さらに浮遊砂濃度変動を数値モデルにより計算可能であることを示した。しかし、現実の傾斜海浜に適用するためには、さらに碎波に伴う乱れによる底質の巻き上げや戻り流れの影響などを考慮しなければならない。

本研究では、斜面上で碎波する波群に関して室内実験と数値実験を行い、その特徴を把握するとともに、波高の変動や長周期波が浮遊砂輸送に果たす役割を検討する。さらに、傾斜海浜上の不規則波条件へ適用可能な浮遊砂輸送予測モデルを構築することを目的とした。

2. 室内実験

2.1 実験方法と条件

造波水路に勾配 $\tan \beta = 1/10$ および $1/20$ の斜面を設置し、4 m の区間にわたって中央粒径 $d_{50} = 0.18$ mm の標準砂を敷きならした。一様水深部の水深を 30 cm とし、斜面上の数点で水面波形、底面流速、浮遊砂濃度をそれぞれ容量式波高計、超音波流速計、光学式濃度計で計測した。光学式濃度計の検定は、別途攪拌水槽で、実験時に用いたものと同じ底質を用いて定常的な濃度場を作っ

て行い、濃度と出力電圧の関係が線形であることを確認した。波群には、周期がわずかに異なる二成分波を合成した波を用い、成分波同士の二次干渉を考慮して、非線形性を含む造波信号を作成した。

計測は、造波開始後安定した微地形が形成されてから

開始し、各点で3分間連続計測した。勾配 $1/20$ の条件では、30分の波作用後水槽側面から地形変化を測定し、観測部から出た砂を回収した。勾配 $1/10$ の条件では、地形変化量が大きく、砂層下の底面が露出してしまうため、波の作用時間を10分間とした。測定点は、勾配 $1/20$ では汀線から 300, 240, 180, 120, 60 cm の地点とし、流速と浮遊砂濃度は砂漣の谷上 2 cm の位置で計測した。勾配 $1/10$ の条件では造波時間が短いため、30 cm の一地点のみで計測した。

実験は、波高、周期、一つの波群に含まれる波数を変化させて、合計 29 ケース行った。実験条件をまとめて表-1 に示す。ここで、 $H_1 (= H_2)$ 、 T_1 、 T_2 は造波器に入力した二成分波のそれぞれの波高と周期、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ は一様

表-1 実験条件

勾配1/20							
ケース	$H_1 (= H_2)$ (cm)	T_1 (s)	T_2 (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	T_2 (s)	x_0 (cm)
1	3	1.0	1.2	5.7	1.04	5.84	53
2	4	1.0	1.2	7.7	1.04	5.79	133
3	5	1.0	1.2	9.7	1.03	5.84	—
4	3	1.2	1.44	5.9	1.28	7.01	120
5	4	1.2	1.44	7.5	1.27	7.01	103
6	5	1.2	1.44	9.5	1.26	7.00	180
7	3	0.8	0.96	6.6	0.83	4.67	166
8	4	0.8	0.96	9.0	0.83	4.68	—
9	3	1.0	1.1	6.5	1.01	10.64	136
10	4	1.0	1.1	8.8	1.01	10.63	173
11	5	1.0	1.1	11.0	1.00	10.64	206
12	3	1.2	1.32	6.5	1.22	12.76	133
13	4	1.2	1.32	8.5	1.22	12.76	210
14	5	1.2	1.32	10.9	1.22	12.76	263
15	3	0.8	0.88	6.9	0.79	8.50	—
16	4	0.8	0.88	9.4	0.78	8.51	—
勾配1/10							
ケース	$H_1 (= H_2)$ (cm)	T_1 (s)	T_2 (s)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	T_2 (s)	x_0 (cm)
101	3	1.0	1.2	6.2	1.05	5.76	26
102	4	1.0	1.2	9.4	1.06	5.80	23
103	5	1.0	1.2	11.4	1.06	5.78	20
104	3	1.2	1.44	6.1	1.26	7.01	43
105	4	1.2	1.44	8.4	1.27	7.02	33
106	5	1.2	1.44	10.5	1.27	7.01	20
107	3	0.8	0.96	7.5	0.83	4.46	33
108	4	0.8	0.96	9.0	0.85	4.69	40
109	3	1.0	1.1	6.6	1.02	10.71	26
110	4	1.0	1.1	8.9	1.02	10.72	36
111	3	1.2	1.32	6.8	1.23	12.89	53
112	3	0.8	0.88	7.1	0.81	8.54	33
113	4	0.8	0.88	9.6	0.79	8.55	173

* 正会員 工博 建設省土木研究所 海岸研究室

** 正会員 工修 ハザマ

*** 学生会員 横浜国立大学大学院 工学研究科

水深部で計測された有義波高と有義波周期, T_i は波群の周期, x_0 は net の漂砂量が 0 になるいわゆる null-point の位置である。ただし, 本研究では静水汀線から沖向きに x 軸をとっている。 $T_{1/3}$ と T_i を比較すればわかるように, 一波群の中に 5 波程度の波が含まれる条件と, 10 波程度含まれる条件を検討した。 Mimura ら (1986) の実験によると, 不規則波による海浜断面形の形状は, Sunamura・Horikawa (1974) の C 値で分類でき, 有義波の諸元を用いると, $C=5$ と $C=13$ が堆積型・中間型・侵食型の境界になる。本実験の波群の条件を有義波の諸元を用いて整理すると, 図-1 のようになり, 本研究の実験条件では中間型から侵食型の断面地形変化が予想されることになる。ここで, $(H_{1/3})_0$, $(L_{1/3})_0$ は, それぞれ有義波相当の沖波波高と沖波波長である。

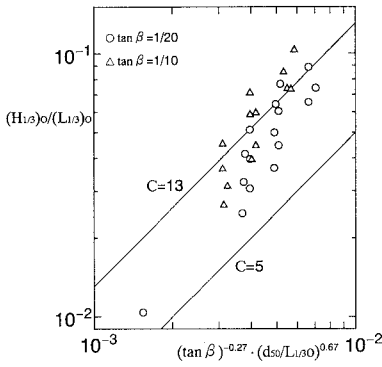


図-1 本実験の条件

2.2 地形変化と漂砂量

図-2 は, 地形変化の計測例を示したものである。図中 ∇ , \blacktriangledown 印は波群の中の最も大きな波が碎波する位置であり, ∇ 印は巻き波碎波, \blacktriangledown 印は崩れ波碎波の碎波点である。すべての条件で, 汀線付近と碎波点付近に堆積する中間型の地形となった。特に, 汀線で侵食が生じると思われた大波高の条件でも, 汀線付近には常に堆積がみられた。また, 碎波点付近の堆積は碎波形式が巻き波の時に顕著で, 突っ込み点付近にバーの形成がみられた。地形変化量から漂砂量を逆算する場合には, 地形の測定精度が問題となる。本実験の測定結果では, 波作用前後で砂の総体積が減少し, そのまま漂砂量を計算すると不合理な結果を招くことになった。そこで, 波作用により砂層が一様に締め固められたと考え, 地形測定値を補正することにした。図-2 にはこのような補正後の地形を示してある。

地形変化量から算定した漂砂量は, 図-3 に示すように, ほとんどのケースで碎波点付近では沖向きで, 汀線付近で岸向きへと方向を転じる。これは, 碎波点付近では, 波高が高く浮遊砂が多い時に沖向きの流れとなるのに対し, 汀線付近ではその位相関係が逆転していたためである。大波高の条件でも汀線付近でかなり大きな岸向きの漂砂量がみられ, これは波群に特有の長周期変動の作用によるものである。また, 勾配 1/10 の条件の方が勾配 1/20 の条件より漂砂量が多い。これは, 碎波形式が巻き波型のものが多く, 激しい砂移動が生じていたためである。

図-4 は, null-point の位置 x_0 と沖波波形勾配の関係

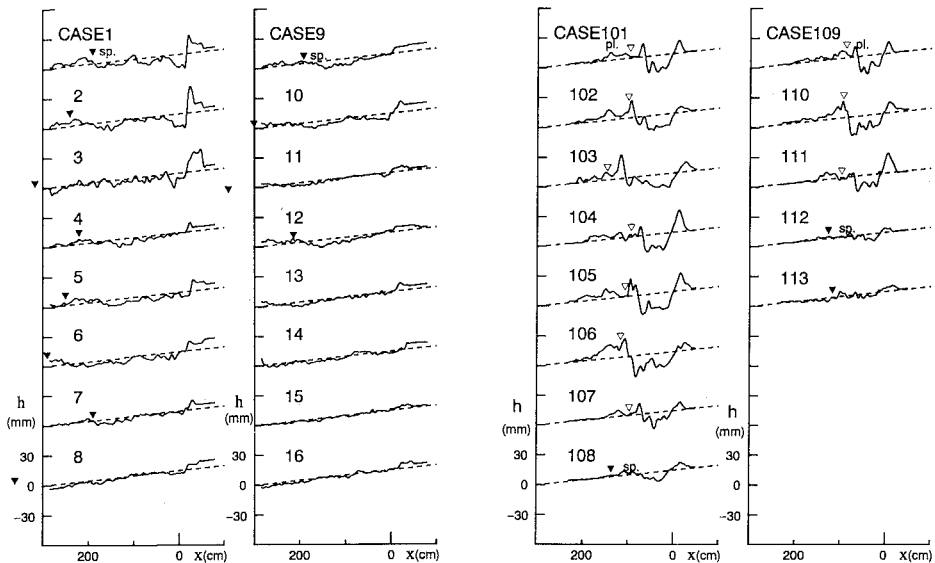


図-2 波群による地形変化

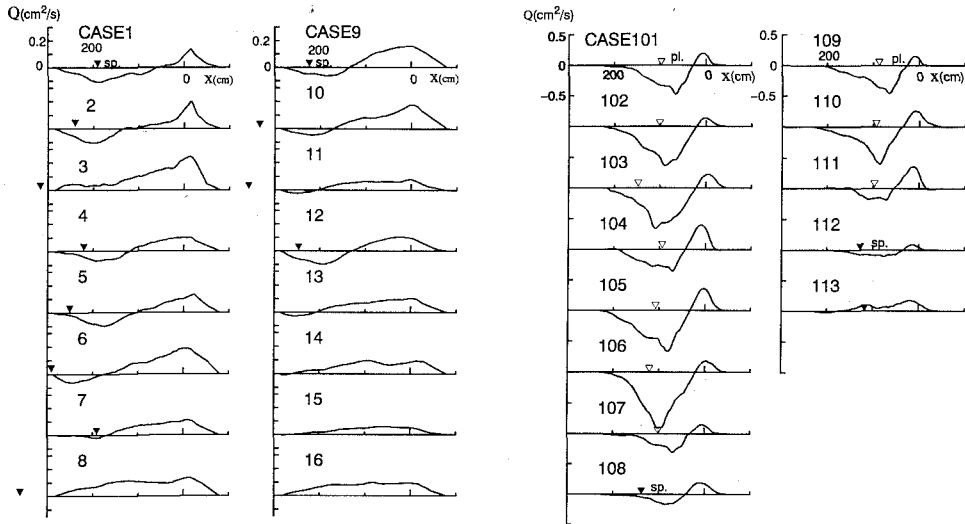


図-3 波群による net の漂砂量

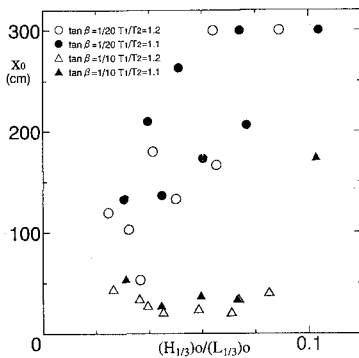


図-4 漂砂量の反転位置と波形勾配の関係

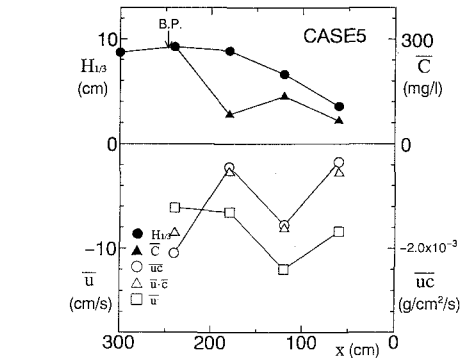


図-5 波高・平均流速・平均濃度・浮遊砂フラックスの分布

を示したものである。ただし、観測区域内で漂砂量が符号を変えない条件では $x_0 = 300$ cm としてある。勾配 1/20 の条件では、波形勾配が大きくなるにつれて、 x_0 が大きくなるのに対して、勾配 1/10 では x_0 はほぼ一定値となっている。また、波群に含まれる波の数が 5 波程度の条件 (○, △印) より、波群に含まれる波の数が 10 波程度の条件 (●, ▲印) の方が、若干ではあるが x_0 が大きくなる傾向がある。これは、長周期波がより発達する条件の方が、汀線付近の堆積範囲が増大するためであると考えられる。規則波を用いた Watanabe ら (1980) の実験結果や、不規則波による Mimura ら (1986) の実験結果ではいずれもこのような傾向はみられない。

2.3 浮遊砂濃度変動

図-5 は、ケース 5 における有義波高 $H_{1/3}$ ・平均流速 \bar{u} ・平均濃度 \bar{C} ・浮遊砂フラックス $\bar{u}c$ の分布を示したものである。図中 B.P. の矢印は、波群の中の最も大きな波

が碎波している位置である。また、△印は、平均流速と平均濃度の積を表している。勾配 1/20 の全てのケースについて検討した結果、浮遊砂の輸送はほとんどの地点で沖向きで、定常成分の輸送が大部分を占めていることがわかった。また、汀線近傍では浮遊砂フラックスが小さくなり、岸向きに転じるケースもみられた。勾配 1/10 の条件では、測定点が 1 点のみなので分布形状は不明であるが、浮遊砂濃度、フラックスともに 1/20 勾配の条件より 1 オーダー大きくなっていった。

図-6 は、例としてケース 5 における底面流速 (実線) と浮遊砂濃度 (細線) を重ねて示したものである。まず、流速波形をみると、碎波帯外 ($x = 240$ cm) では波群に拘束された長周期変動 (破線) がみられる。碎波帯内では、流速の平均値が沖向きとなるとともに長周期変動の発達がみられ、汀線近傍では短周期成分よりむしろ長周期成分の振幅の方が大きくなる。浮遊砂濃度については、

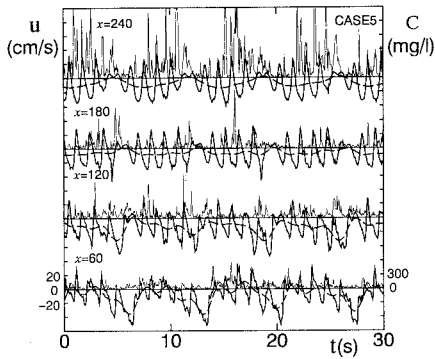


図-6 底面流速と浮遊砂濃度の変動波形

砕波帯外では波群の周期で規則的な浮遊砂の発生がみられ、波高が大きな時に浮遊砂の発生が始まり、波高が低くなると浮遊砂濃度も低くなる。また、浮遊砂が発生している位相で、流速の長周期成分は沖向きとなっていることが多い。一方、砕波点付近から砕波帯内では浮遊砂の発生が不規則となるとともに、長周期成分波との位相関係が明瞭でなくなり、汀線近傍ではむしろ流速の長周期成分が岸向きの時に浮遊砂濃度が高くなることが多い。これは、砕波帯内では、砕波による乱れの影響と長周期変動の果たす役割が大きいと認められ、これが汀線付近でみられた岸向きの砂移動と対応しているとされる。

3. 数値実験

3.1 浅水砕波変形モデル

数値モデルは、波動成分の変形と長周期変動・定常成分を同時に計算できる Boussinesq 方程式を用いて構築した。入射境界は $x = 300$ cm の地点とし、入射波には、水位と流速の実測値から入射波を分離して反射波を取り除いたものを用いた。汀線境界は、岩崎・真野 (1979) の方法により、波の遡上運動を考慮した移動境界とした。砕波点は、波峰における流速波速比を用いて決定した。すなわち、まず水位の空間波形をもとにゼロダウンクロス法により個々の波を定義し、個々の波の波峰における水粒子速度から砕波・非砕波を判定した。そして、砕波している波については、渦動粘性係数を用いたエネルギー逸散項を導入して計算した。計算法の詳細は、片山・佐藤 (1993) に述べられている。

図-7 は、実験のケース 2 の条件に対して、底面付近の流速波形を比較したものである。数値モデルにおける流速の評価精度が十分でないため、汀線に近づくほど短周期成分の位相のずれが大きくなるが、砕波による振幅の変化と長周期変動の発達が予測されている。

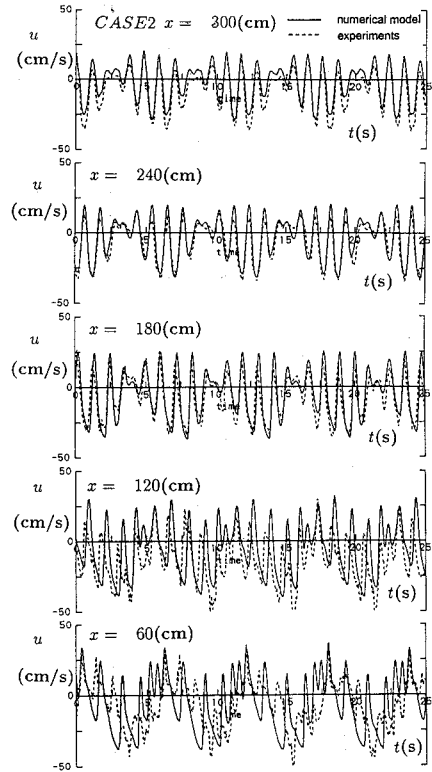


図-7 底面近傍の流速波形

3.2 底質の浮遊モデル

計算された底面流速変動から底質の巻き上げ率を計算し、さらにこれを境界条件として佐藤ら (1991) と同様の手法を用いて拡散方程式を解くことにより、浮遊砂濃度変動を計算した。図-8 は、ケース 2 の条件における波群の一周期に対して底面付近の浮遊砂濃度を比較したものである。長周期変動が底質の輸送に果たす役割は未だ不明確な部分が多いため、底質の巻き上げ率を、流速波形から直接計算するモデルと長周期変動成分を除いて計算するモデルを比較した。高波が通過した直後の波群の後半部で高い浮遊砂濃度の発生が予測されており、実験と計算の対応は良い。

図-9 は浮遊砂フラックスの岸沖分布を比較したものである。底質の巻き上げ率を、長周期波を除いて計算するモデル (▲印) が実測値と良く一致することがわかる。さらに、不規則波条件についても底面流速・浮遊砂濃度について実験との比較を行い、一部の条件で数値モデルの妥当性を検証した。今後、砕波による乱れの影響を考慮してモデルの汎用性を高める必要がある。

4. 結 論

本研究では、斜面上で砕波する波群を用いて岸沖漂砂

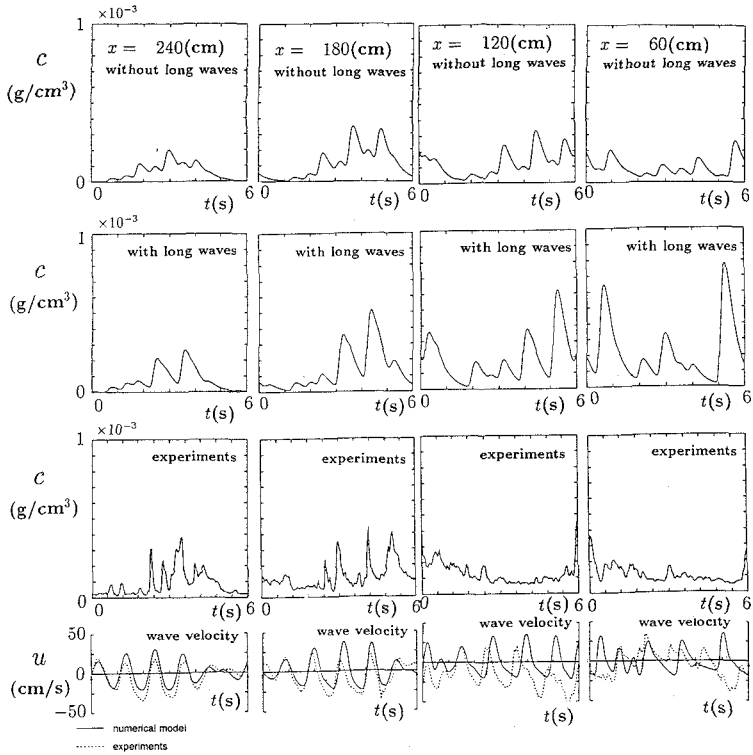


図-8 浮遊砂濃度の比較

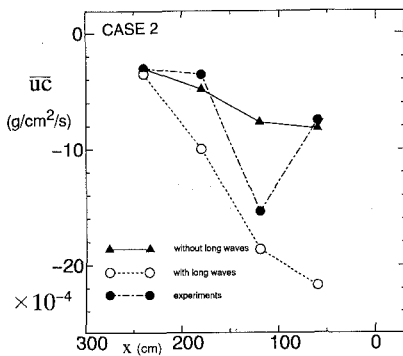


図-9 浮遊砂フラックスの比較

と海浜変形に関する室内実験と数値実験を行い、以下の結論を得た。

(1) 波群による漂砂は、大波高の条件でも汀線近くで岸向きとなるのが特徴である。そのため、海浜地形は碎波帯外と汀線付近に堆積する中間型となることが多い。汀線付近の堆積は、底勾配が緩いほど、また、波群に含まれる波数が多いほど顕著となる傾向がある。

(2) 波の非線形性を考慮した数値モデルで、波群の碎波変形と長周期変動の発達を計算できる。計算された

流速を用いて浮遊砂の濃度変動と輸送量を計算することができる。

(3) 数値モデルは不規則波条件にも適用可能である。

参 考 文 献

佐藤慎司・島谷 学・志村豊彦 (1993): 不規則波碎波帯における浮遊砂輸送量の解析法, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 321-325.
 佐藤慎司・斉藤栄一・上月晃生 (1991): 波の連なりが漂砂量に及ぼす影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 246-250.
 片山裕之・佐藤慎司 (1993): Boussinesq 方程式を用いた不規則波の浅水・碎波変形の計算法, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 16-20.
 岩崎敏夫・真野 明 (1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 70-74.
 Mimura, N., Y. Ohtsuka and K. Horikawa (1986): Laboratory study on two-dimensional beach transformation due to irregular waves, Proc. 20th Coastal Eng. Conf., pp. 1393-1406.
 Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., pp. 920-938.
 Watanabe, A., Y. Riho and K. Horikawa (1980): Beach profiles and on-offshore sediment transport, Proc. 16th Coastal Eng. Conf., pp. 1106-1121.