

非対称砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究

砂 村 継 夫*・阪 東 浩 造**・堀 川 清 司***

1. はじめに

波は水深の浅い所に侵入するにつれて、非線型性を増し、水粒子の流速場は非対称となり、net の漂砂量を生ずるようになる¹⁾。海浜変形は net の漂砂量を引起こすような砂移動の機構が存在しなければ起こりえないのであるから、海浜変形の問題はこのような流速場での砂移動機構の解明、さらには漂砂量の把握なくしては解決できない。

非対称流速場において砂移動が生ずる場合、底面流速が小さいうちは砂は掃流状態で net として岸向きに運搬されるが、流速が大きくなると岸側に急斜面をもつ非対称な砂れんが形成されるようになる。この場合、ある条件下では砂れんの岸側で巻き上げられた砂は徐々に沖方向へ運ばれていくことが報告されている^{2),3)}。この沖向きの浮遊漂砂の挙動を把えることは、海浜の侵蝕問題を考える上で特に重要である⁴⁾。しかし、高速でかつ複雑な現象のため、このような波状境界面上での浮遊砂の挙動は十分に解明されているとは言えず、さらにその量と波の諸元および底質粒径との関係は全く明らかにされていない。本研究では、これらの問題を解決するための第一歩として、単純な条件下で水路実験を行い、非対称砂れん上での砂移動機構の解明と漂砂量算定式の導入を試みた。

2. 実験条件および方法

実験は小型 2 次元造波水路 (長さ 6 m, 幅 20 cm, 高さ 30 cm) の中央部に長さ約 1 m, 幅 20 cm, 厚さ 4 cm の水平床を豊浦の標準砂 (粒径 0.2 mm, 密度 2.65 g/cm³) を用いて作り、これに種々の波を作用させて、非対称砂れんを形成させた。波高 $H=4.6\sim7.4$ cm, 周期 $T=0.84\sim1.14$ sec, 水深 $h=10\sim14$ cm の条件を適宜組合せて、19 ケースの実験を行った (表-1)。砂移動機構の解明のために 16 mm 高速度シネカメラを、漂砂量の把握のためにアイオア型の濃度計およびモルタル製の固定砂れん

表-1 実験ケース・条件・測定結果

ケース No.	T (sec)	H (cm)	h (cm)	平均濃度 C (g/cm ³)	沖向き浮遊砂量 (net) S (g/cm/wave)
				$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$
1	1.05	5.4	12.0	10.5	10.2
2	0.97	4.7	12.0	2.75	3.30
3	0.90	6.8	12.0	20.3	11.1
4	0.96	5.7	10.0	12.2	19.1
5	0.96	4.6	10.0	5.08	6.30
6	0.91	4.9	10.0	9.50	10.3
7	0.96	6.1	14.0	16.3	5.80
8	0.95	5.0	14.0	1.58	1.50
9	0.89	7.3	14.0	7.46	4.90
10	0.83	6.8	14.0	4.85	4.40
11	0.90	5.4	12.0	4.89	4.90
12	0.86	5.8	12.0	6.10	5.10
13	0.84	4.7	12.0	2.22	1.50
14	0.92	5.8	14.0	2.69	2.30
15	1.06	7.0	14.0	11.4	15.6
16	1.14	7.4	14.0	14.7	20.6
17	1.14	5.7	14.0	10.5	5.30
18	1.11	5.5	14.0	6.65	5.10
19	1.12	7.0	14.0	13.3	9.30

を用いた。

3. 砂移動機構

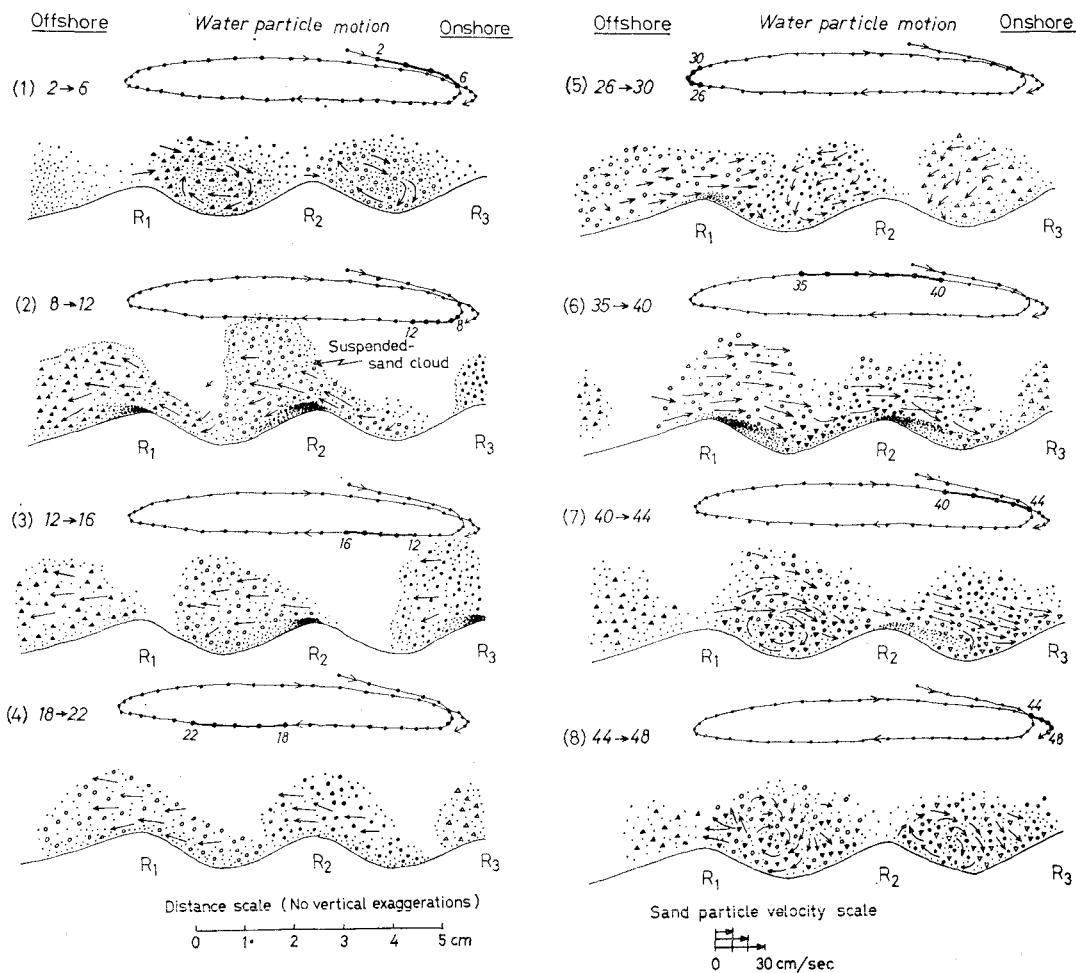
16 mm シネカメラを用いて撮影 (コマ送り速度は 200 ~ 500 frames/sec) された砂移動状況を示すフィルムはフィルム・アナライザーを用いて解析された。波の記録は容量式波高計を用いて行い、波形記録と 16 mm フィルムのコマには同時にパルスを入れて同期させた。なお、水粒子の運動を調べるために多数の中立フロート (直径約 2 mm のポリスチレン球) を投入し、同時撮影を行った。

砂移動状況の一例を図-1 に示す。図中の矢印は砂粒子の速度ベクトルである。岸向きの最大流速を生ずる位相から約 $\pi/6$ ほど遅れて、砂れんの岸側に砂を巻き込んだ渦が形成され始める (図-1(1), 砂れん R_2 の白丸の砂粒子群に着目)。このような渦は、流れの方向が逆転し始めるまで形成され続ける。流れが沖向きになると、いままで渦に巻き込まれていた砂粒子は、砂れんの頂部から斜め上方に打上げられ、浮遊砂雲を形成する (図-1(2))。この時、砂れん頂部近傍では沖向きの掃流砂がみられる。浮遊砂雲は、それを構成する砂粒子の一部を堆積させながら沖へ移動する (図-1(3))。堆積作用を伴いつつ、さらに沖方向へ運ばれ、その先端は砂れん R_1 の

* 正会員 工博 筑波大学助教授 地球科学系

** 正会員 工修 鹿島建設株式会社 電子計算センター

*** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科



図—1 非対称砂れん上での砂移動状況 (ケース 17)

沖側凹部にまで達する(図—1(4)). 流れの方向が沖向きから岸向きに変化すると, 浮遊砂の運動方向も逆転し, 岸方向へ運搬されるようになる(図—1(5)). この流向逆転時に, 砂れんの沖側緩斜面上で渦が形成されることがあるが, 岸側急斜面上で形成される渦に比べて, 渦中の砂粒子の運動は緩やかで, 渦が形成されている時間も短い. 岸向きの最大流速が生ずる時点で, 砂れん頂部には岸向きの掃流砂が発達する(図—1(6)). 沖へ運ばれた浮遊砂のうち, まだ浮遊状態にあるものはこの流れによって, 浮遊砂が形成された場所(この場合では, R_2 の岸側)へ戻されつつある. しかし, この浮遊砂の大部分は, R_1 の

岸側で発生する渦に巻き込まれてしまい(図—1(7)), R_2 の岸側まで戻ってこられる砂は少ない(図—1(8)).

すべての実験ケースにおいて, このような漂砂機構が観察された. すなわち波の谷が通過したときの沖向きの流れで沖へ運ばれた浮遊砂の大部分は, 波の峰が通過したときの岸向きの流れによって元の場所に戻される途中で, 一つ沖側の砂れんで発生する渦に捕えられてしまい, 結局元の場所まで戻ってこられず, 波の通過に伴って徐々に沖へ運搬されて行く. 図—1 に描かれた水粒子の運動が示すように, 底面付近の波の質量輸送の方向は岸向きである. それにもかかわらず, このような沖向き

の砂移動が存在するという事は、質量輸送の影響はこの種の砂移動とは直接関係ないことを意味する。この種の砂移動にとって重要なことは、砂れんの岸側で形成される渦の存在である。

4. 漂砂量算定式

図-2 に、上述の砂移動状況を模式的に示す。いま、この図において砂れん R_2 の頂部に検査面をとり、これを通る砂の量を波の一周期にわたって考える。冲向きに運ばれるものは、(1) 浮遊砂雲を形成する S_2 , (2) 掃流砂 $(B_2)_{\text{offshore}}$, (3) 砂れん R_3 で発生した浮遊砂雲 S_3 の一部 S_3' であり、岸向きのものは、(4) S_3' のうちまだ浮遊しているもの S_3'' , (5) 掃流砂 $(B_2)_{\text{onshore}}$, (6) 戻ってきた S_2 の一部 S_2' である。これらの諸量のうち、(2) と (5), (3) と (4) はそれぞれほぼ等しいとみなせる。また (6) は S_2 に比べてはるかに小さいと考えて、これを無視すると net として沖へ運ばれる量は結局 S_2 , すなわち形成直後の浮遊砂雲中の砂の量となる。

浮遊砂雲はその形およびその中に含まれる砂の濃度が時間的にも場所的にも一定しておらず、浮遊砂雲中の砂

の全量を直接実測することは現在のところ非常にむづかしい。浮遊砂雲は渦から形成されるのであるから、浮遊砂雲中の砂の量は近似的に、渦の形成領域(面積)と渦中の砂の平均濃度とを掛けたもので表わせると考える。すなわち

$$S = A \times C \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに S : net として沖へ向う、一波当たり単位幅当りの浮遊砂量, A : 渦の形成領域(図-3), C : 渦の中での砂の時間平均濃度である。なお、渦が形成されている領域内では、砂の濃度の場所的变化は少ないと考えられる。

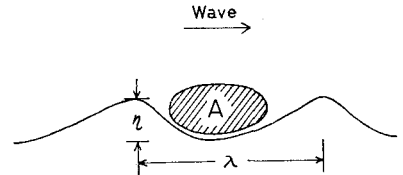


図-3 渦の形成領域および砂れんのスケールを示す模式図

A は砂れんのスケール(波長 λ , 波高 η (図-3))と比例関係にあると考えられる。すなわち

$$A \sim \lambda \eta \quad \dots\dots\dots (2)$$

λ, η は波の諸元と関係づけることができる⁵⁾ので、式(2)は次のようになる。

$$A = k_1 u_{\max}^{-0.578} d_0^{1.422} \nu^{0.578} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $u_{\max}$: 底面付近の最大流速 $= \pi H / T \sinh(2\pi h / L)$, L : 水深 h における波長, d_0 : 底面での水粒子の全振幅 $= u_{\max} T / \pi$, ν : 水の動粘性係数, k_1 : 定数である。実測した砂れんのスケールおよび 16 mm シネフィルムから読み取った渦の形成領域を用いて式(3)中の定数を決めると、次のようになる。

$$k_1 = 4.92 \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に、 C は次式で表わせるものと仮定する。

$$C = k_2 \rho \frac{u'(u_{\max} - u_0) \tau}{\nu} \quad \dots\dots\dots (5)$$

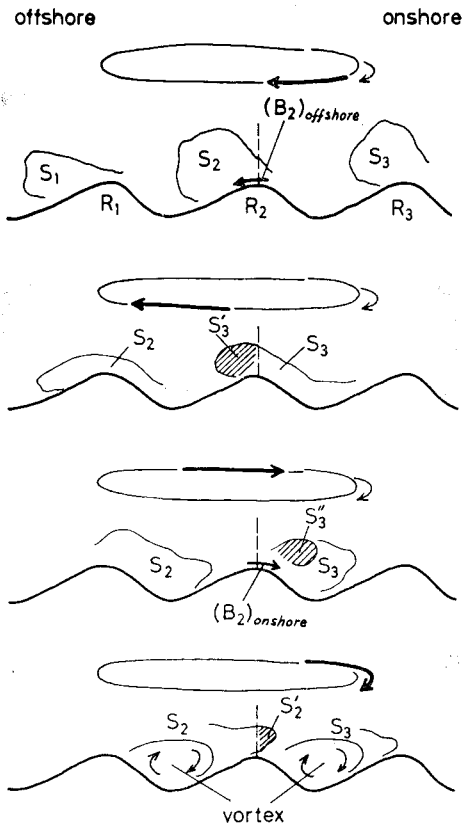
ここに、 u' : 渦の外縁での水粒子の平均速度, u_0 : 砂移動の限界流速, τ : 渦が形成されている時間, ρ : 水の密度, k_2 : 定数である。この式は、余剰流速 $(u_{\max} - u_0)$ によって運び込まれた砂が流速 u' によって時間 τ の間、渦を形成している時の濃度を表現しようとしたものである。 τ は T に、 u' は $u_{\max}$ にそれぞれ比例すると考えると、式(5)は

$$C = k_2' \rho \frac{u_{\max} (u_{\max} - u_0) T}{\nu} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 k_2' : 定数である。ここで、 u_0 は Komar・Miller の次式⁶⁾で与えられるものを用いることにする。

$$\frac{\rho u_0^2}{(\rho_s - \rho) g D} = 0.21 \left(\frac{d_0}{D} \right)^{0.5} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ρ_s : 砂の密度, D : 砂の粒径, g : 重力の加速度

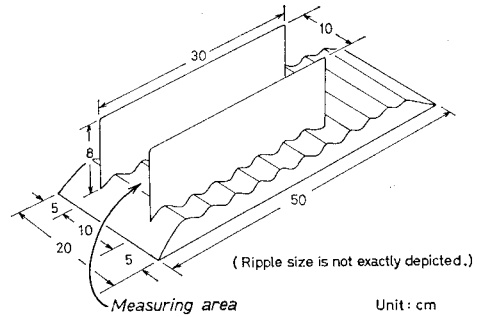


R: Sand ripple, B: Bed load, S: Suspended load

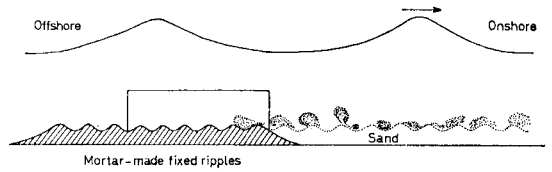
図-2 非対称砂れん上での砂移動を示す模式図

である。

渦の中の砂濃度の場所による変動は少ないので、濃度測定は渦の中心付近にアイオア型の濃度計（発光ダイオードとフォトトランジスターから成る）を設置して行われた。濃度計の発光部と受光部の大きさはそれぞれ直径 3 mm, それらの間隔は 10 mm である。長時間濃度計を設置しておくで砂れんの形状が乱れるので、4～5 波の濃度を測定した後それを撤去した。なお、濃度記録と波形記録とは同期している。ここで用いた濃度は、一波ごとに渦が形成されている時間に相当する濃度記録を平均（時間平均）し、さらにこれらを連続する 3 波にわたり平均したものである。実測の C と $u_{\max}(u_{\max}-u_0)T\rho/\nu$ との相関を調べてみると、かなりのデータのバラツキがある（図—4）が、両者が図中の直線で表わせるような比例関係にあるとすると、式 (6) 中の k_2' は次のようになる。

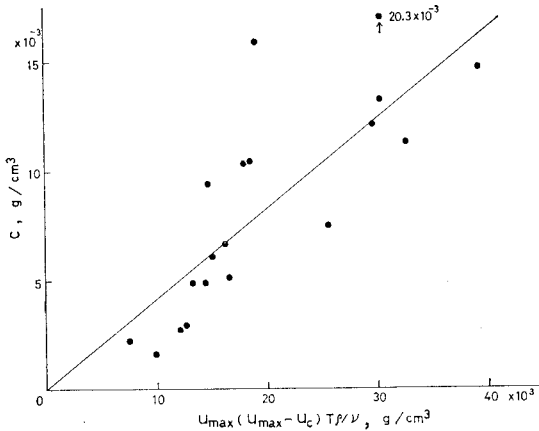


図—5 モルタル製固定砂れん



図—6 固定砂れんの設置状況

砂れんのスケールに近いものをあらかじめ選んでおく）を設置し、波を作用させ砂れんを発生させる（図—6）。砂れんの形状が安定してから波を止め、測定部に堆積している砂を除去し、再び波を作用させる。固定砂れんの測定部沖側端には砂止め用の金網がないため、長時間波を作用させておくと測定部に入った砂が沖方向へ逃げてしまう。そこで、観察により砂が逃げ出す前に波を止めて、測定部上の砂を集め質量を測定し、幅（10 cm）と波数で割って、単位幅・一波当りの沖向き浮遊砂量とした。波数は実験ケースにより異なり、20～80 波であった。なお測定中、固定砂れんに隣接した砂れんの変形はほとんどなかった。



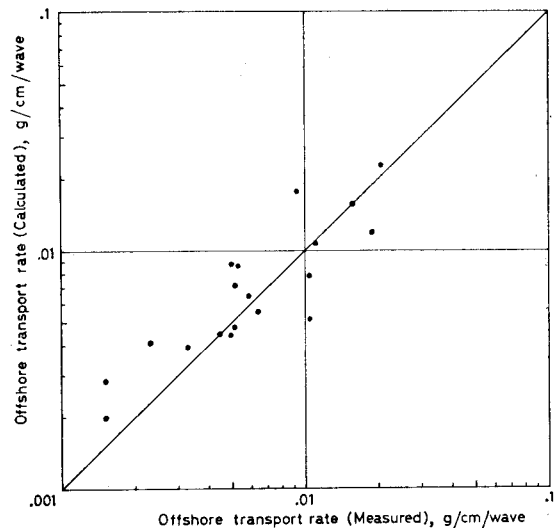
図—4 砂の濃度 C (実測値) と $u_{\max}(u_{\max}-u_0)T\rho/\nu$ との関係

$$k_2' = 4.2 \times 10^{-7} \quad (8)$$

式 (3), (4), (6), (8) を式 (1) へ代入すると次式を得る。

$$S = 2.1 \times 10^{-6} \rho \left(\frac{u_{\max} \cdot d_0}{\nu} \right)^{0.422} (u_{\max} - u_0) d_0 T \quad (9)$$

式 (9) の妥当性を調べるために、沖方向へ運搬される浮遊砂量の実測を試みた。できる限り自然状態（すなわち波状境界面上）で浮遊砂を捕えるため、図—5 に示すようなモルタル製の固定砂れんを用いた。この砂れんのスケールは、表—1 の実験条件と同一の条件下で行った予備実験の結果をもとにして決められたもので、 $\lambda = 3.8$ cm, $\eta = 0.8$ cm と $\lambda = 2.9$ cm, $\eta = 0.5$ cm の 2 種類である。測定部は、平行する二つの壁で仕切られた幅 10 cm の中央部である（図—5 参照）。測定の手順は次の通りである。まず水平砂床の沖側へ固定砂れん（実験条件により、2 種類の固定砂れんのうちから、スケールが自然の



図—7 沖向き漂砂量の実測値と式 (9) による計算値の比較

図-7 は実測の S と式(9)を用いて計算した S との相関を示したものである。データのバラツキはあるが、近似的には式(9)が妥当であるといえよう。

5. おわりに

水平床で、かつ底質粒径 0.2 mm という限定された条件ではあるが、浮遊漂砂機構を明らかにすることができ、式(9)を用いることにより、net として沖へ向う沖砂量の推定が可能となった。式(9)が、粒径の異なる底質さらには傾斜床にも適用できるかどうかについての検討は今後の課題である。

本研究は、文部省科学研究費(代表者 榎木亨阪大教授)およびトヨタ財団研究助成金による研究である。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 堀川清司・砂村継夫・柴山知也: 二次元海浜変形に関する実験的研究 — 沖浜帯における漂砂量測定法 —, 第24回海岸工学講演会論文集, pp. 170~174, 1977.
- 2) 佐藤昭二・田中則夫: 水平床における波による砂移動について, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 95~100, 1962.
- 3) 前出 1).
- 4) 前出 1).
- 5) 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一: 波による浮遊砂に関する研究, 第11回海岸工学講演会講演集, pp. 159~168, 1964.
- 6) Komar, P.D. and M.C. Miller: Sediment threshold under oscillatory waves, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 756~775, 1974.