

波と流れが任意角度で斜交する場での漂砂量

柴山 知也*・浅田 英幸**・天明 敏行***・佐藤 慎司*

1. 緒 論

砕波帯内の岸沖及び沿岸方向の漂砂量を定量的に予測するためには、波と流れが任意の角度で交わるなどの複雑な流速場の下での漂砂量評価法を確立する必要がある。本研究はこのような場での漂砂量評価法確立のために新たに波流れが任意角度で交わる場での基礎実験を行い、その結果を踏まえて従来の研究結果と比較総合して確かな評価法を提案することを目的としている。

波流れが交差する場における漂砂量の計測としては平面振動流装置を用いた香取ら(1983)の実験がある。彼らは波流れが直交する場における沿岸(流れの方向)漂砂量のデータを用いて沿岸漂砂量を求めている。これに対して本研究では平面波動水槽で波流れが任意角度で交差する場を作り、波流れ交差場における沿岸漂砂のみではなく、岸沖漂砂をも論じようとしている点に特徴がある。また特に漂砂を論じる際に量的に大きいという理由で重要と思われる強い沖向き定常流の存在する下での岸沖漂砂に付いては別途の実験を行い、平面実験での結果を確認した。

2. 平面実験

(1) 実験方法

実験Ⅰ(平面実験)では9×9mの造波装置付き平面水槽に局所的に定常流を発生させる装置を設置し、この装置の設置角度を変化させることにより、波流れの交差角度を55~130度の間で変化させた。定常流発生装置の概観を図-1(上部)に示す。装置後部の貯水部分にポンプで水を送り、また越流堰の高さを調節することにより一定の定常な流速場を発生させている。

流速の計測には小型の二成分電磁流速計を用いている。波流れの状態が十分に安定している水槽中央部に観測部を設け(図-1(下部)参照)、漂砂観測用のトレイを設置した。このトレイは図中に示すように岸沖及び沿岸の方向に4分割(A, B, C, D)されており、波流れの

作用前と作用後に、分割された部分に存在する砂の体積の収支をメスシリンダーで計測することにより、岸沖及び沿岸方向の漂砂量を求めることができる。具体的にはトレイAとBの体積変化の合計の絶対値とCとDの合計の絶対値の平均を沿岸漂砂量の絶対値とし、方向は変化量の符号から定めた。岸沖漂砂量は、同様にAとDの合計とBとCの合計から求めることができる。

このような実験装置を用いて、観測点での水深を16.5 cmとし、波と流れの交差角度を55度、70度、100度、130度と変化させた。ここで交差角度は波が定常流発生装置方向に回折するために大きく変化し、その他に波が流れの存在のために屈折したり、流れが波の存在のため

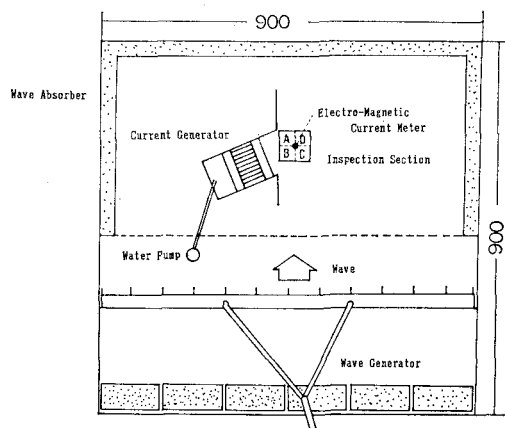
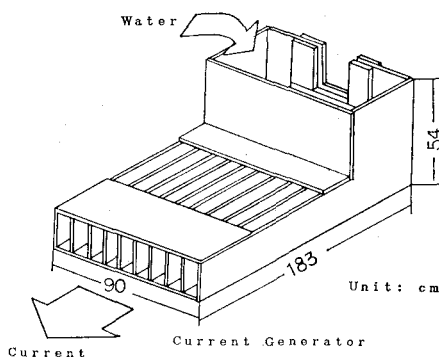


図-1 平面水槽と実験装置の略図

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 正会員 東亜建設工業(株)

*** 正会員 (株)間組

に流軸の方向を変えた効果も含めて上記のような結果となっており、造波装置と定常流発生装置の設定角度はそれぞれ45度、60度、90度、120度であった。またそれぞれに対する定常流速を4 cm/s と6 cm/s の2種類とし、波の条件を周期 0.8~1.2 s、波高 4~6 cm の範囲で変化させて底面軌道流速振幅を18.7 cm/s と16.5 cm/s の2種類に変化させることにより、計16ケースの実験を行った。また、比較のために波のみ（底面軌道流速値は18.7 cm/s）による漂砂量も計測している。表1に実験ケースをまとめて示す。

(2) 実験結果の整理とその検討

実験結果は沿岸方向及び岸沖方向の漂砂に分けて論じた。まず沿岸漂砂については定常流の沿岸方向成分と漂砂の沿岸方向成分との関係を調べた。これに関しては過去に香取ら(1983)の研究があり、振動流装置を用いて波と流れが直交する場合のデータから、沿岸漂砂量と底面仕事率との関係を求めている。本研究では任意角度の斜交場の沿岸方向漂砂量に対して同様の整理を試みた。ここで無次元沿岸漂砂量 Φ_1 、底面仕事率 θ_1 はそれぞれ以下のように与えられる。

$$\Phi_1 = \frac{q_1}{wd} \quad (1)$$

$$\theta_1 = \frac{(\tau_m - \tau_0)u_1}{\rho(sgd)^{3/2}} \quad (2)$$

ここで q_1 ：沿岸方向体積漂砂量、 w ：底質沈降速度、 d ：底質粒径、 τ_m ：底面せん断応力の最大値、 τ_0 ：底質移動限界せん断応力、 u_1 ：沿岸方向定常流速、 ρ ：水の密度、 s ：底質の水中比重である。 τ の計算には Tanaka Shuto(1981)の摩擦係数を用いている。

その結果、図-2 に示すように香取らと類似の関数関係を得ている。図-2 のなかで式

$$\Phi_1 = 0.9 \theta_1^{1.2} \quad (3)$$

は今回の実験データから回帰式を求めたものであり、式

$$\Phi_1 = 1.8 \theta_1^{1.5} \quad (4)$$

は香取ら(1983)の式である。以上の実験結果により、今回の実験データでも香取らの式の有効性が確かめられた。

次に岸沖方向の漂砂について考える。まず縦軸に岸沖方向無次元漂砂量を取り、横軸に岸沖定常流成分をとって整理したのが図-3 である。図より定常流成分が0、すなわち横軸が0の場合の漂砂量を全体の漂砂量から差し引くことにより波流れの漂砂量から波の寄与分を差し引くことはできないかと考えた。

以下では波による漂砂量と岸沖方向流れによる漂砂量の分離を試みる。まずケース 6, 8, 10, 12, 14, 16 に付いては流れを加えない場合の実験結果（ケース1）を用いて、波のみによる岸沖漂砂量を求めた。次にケース 7, 9, 11, 13, 15, 17 に付いては設定交差角度が90度の場合の漂砂量を近似的に波による岸沖漂砂量とした。

波流れ斜交場における岸沖漂砂量から、この波の寄与分を差し引いて、流れによる岸沖漂砂量を求めた。このようにして求めた流れによる岸沖漂砂量と岸沖方向定常流との関係について沿岸漂砂量と同様の整理をした結果を図-4 に示す。図中で

$$\Phi_{20} = 0.8 \theta_2^{1.2} \quad (5)$$

は実験データよりの回帰線を表し、香取ら(1988)の式も同時に示してある。

表-1 平面水槽における実験条件

	設定交差 角 α (deg)	修正交差 角 α' (deg)	水深 h (cm)	定常流 速 u_G (cm/s)	波周期 T (s)	波動流速 振幅 u_W (cm/s)	波・流れ 作用時間 dt (s)
CASE 1	—	—	16.5	0	1.07	18.7	1800
CASE 2	90	104	16.5	5.7	1.07	18.7	1500
CASE 3	90	103	16.5	5.7	1.06	16.8	1680
CASE 4	90	99	16.5	3.5	1.07	18.8	1140
CASE 5	90	103	16.5	4.1	1.06	16.8	1800
CASE 6	60	70	16.5	5.9	1.16	18.9	1620
CASE 7	60	70	16.5	5.9	1.09	16.8	1140
CASE 8	60	69	16.5	3.9	1.18	19.0	1500
CASE 9	60	70	16.5	3.9	1.07	16.5	1680
CASE10	45	56	16.5	5.9	1.20	19.7	1320
CASE11	45	54	16.5	5.9	0.82	16.1	1800
CASE12	45	55	16.5	4.1	1.22	19.0	1680
CASE13	45	57	16.5	4.1	0.99	16.4	1860
CASE14	120	131	16.5	6.2	1.12	18.6	960
CASE15	120	130	16.5	6.2	0.93	16.5	1080
CASE16	120	130	16.5	3.9	1.08	18.5	1140
CASE17	120	129	16.5	3.9	0.96	16.4	1320

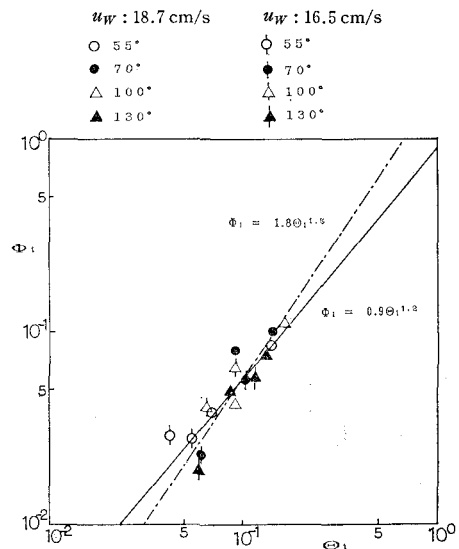


図-2 沿岸漂砂量と沿岸方向底面仕事率

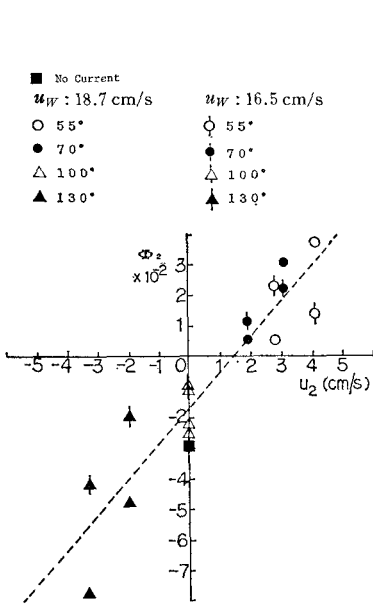
図より波による漂砂量を分離した岸沖流れによる寄与分に付いても沿岸漂砂と同様の関数関係によって表せるようである。波流れ斜交場において波による漂砂量寄与分を除去した後の流れによる成分に付いて、沿岸、岸沖両方向ともに波流れ直交場における沿岸漂砂量式が援用できるという実験結果は重要である。そこで特にこのような評価法が疑問視されている強い沖向き定常流の影響

下での碎波帯内岸沖漂砂に付いて実験Ⅱを行った。

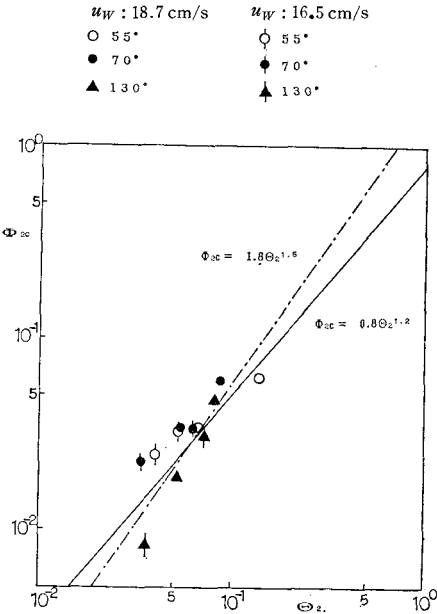
3. 二次元水路を用いた実験

(1) 実験方法

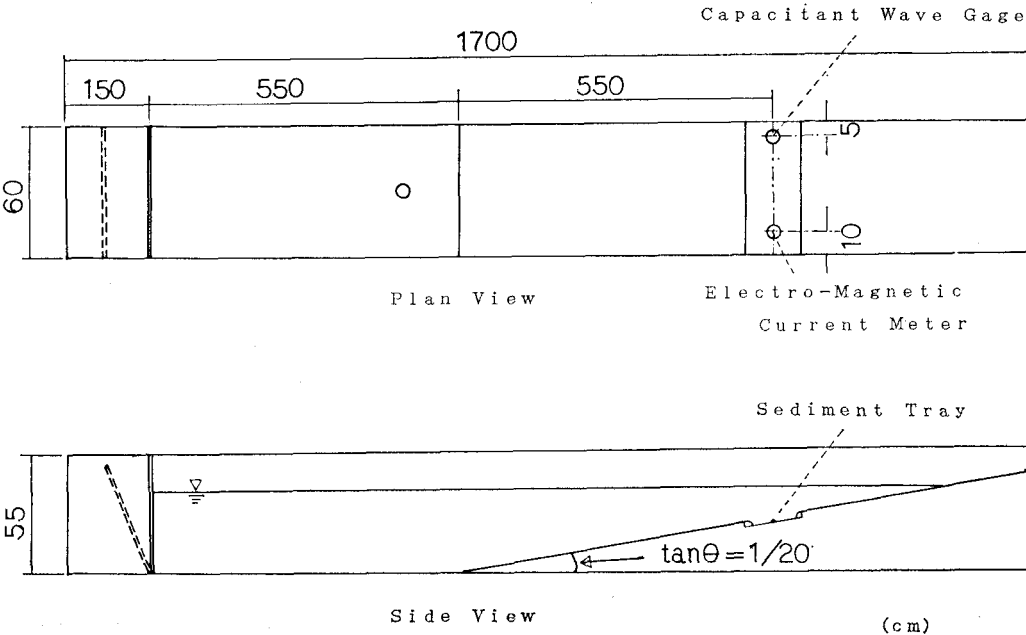
実験Ⅱ（二次元水路実験）は特に碎波帯内で強い底面沖向き定常流が存在する場での漂砂量を検討するために行った。図一5に実験装置の概略を示す。実験には長さ



図一3 岸沖漂砂量と岸沖定常流速



図一4 流れによる岸沖漂砂量と岸沖方向仕事率



図一5 二次元水路実験の概略図

17 m, 幅 0.6 m, 深さ 0.55 m の二次元規則波造波水路を使用した。水路に 1/20 一様勾配のステンレス板で作成した斜面を作成し, その斜面の一部を切り込んで岸沖漂砂量を測定するためのトレイを設置した。波作用前後の岸沖 2 つのトレイ中の砂の体積を比較することにより, 岸沖方向の正味の漂砂量を求めることができる。この漂砂測定部の底面流速を測定するために実験 I で使用したのと同じ電磁流速計を用いた。実験条件としては底質砂を中央粒径 0.18 mm と 0.68 mm の二種類とし, 表面波の周期を 0.7 s から 3.3 s, 沖波波高を 8 cm から 13 cm の間で変化させ, 様々の沖向き定常流の下での計測をすることを目標に合計 32 ケースの測定を行った。表 2 に実験条件及び結果の一部を示す。

(2) 実験結果とその検討

図-6 に図-3 と同様に定常流と漂砂量を整理した結果を示す。碎波点近傍では定常流は常に沖向きであるため定常流, 漂砂とも沖向きを負としてさらに座標軸上では右及び上方を負として描いてある。図の結果より 2. (2)と同様の整理を行うこととした。

まず底面流速の測定結果から従来提案されている岸沖漂砂量を用いて波による寄与分を求め, 波と流れの漂砂

量を分離した。使用した漂砂量式は Madsen・Grant(1976) の半周期平均の漂砂量式とこれを改良した Shibayama・

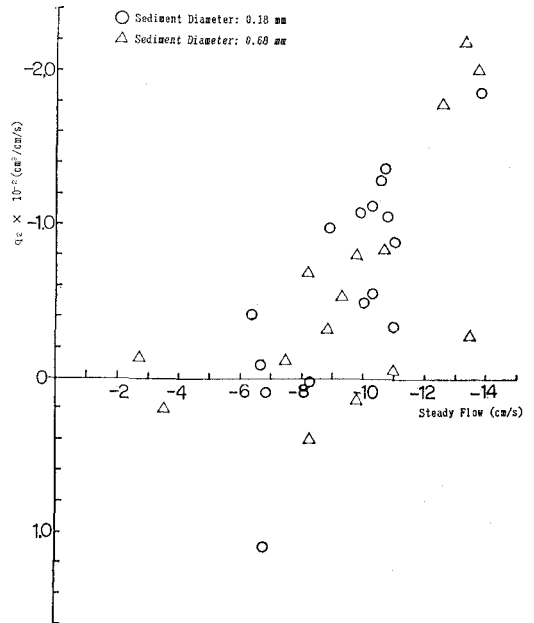


図-6 沖向き定常流速と漂砂量

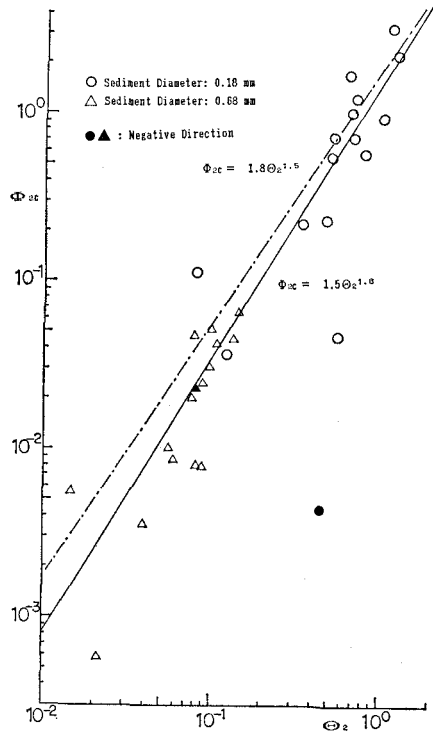


図-7 流れによる岸沖漂砂量と岸沖仕事率

表-2 二次元水路における実験条件

ケース	測点水深 $h(\text{cm})$	測点波高 $H(\text{cm})$	周期 $T(\text{s})$	定常流速 $u_c(\text{cm/s})$	漂砂量 $q_{\text{net}}(\text{cm}^2/\text{s})$ $\times 10^{-2}$	底質粒径 $d(\text{mm})$
1	8.0	4.3	0.79	-10.3	-0.506	0.18
2	9.5	6.0	0.88	-6.7	-0.099	
3	7.8	5.0	0.99	-10.3	-1.133	
4	7.4	3.9	1.00	-6.4	-0.419	
5	5.4	3.6	1.19	-11.0	-0.340	
6	10.2	6.4	1.19	-13.7	-1.856	
7	7.2	4.0	1.24	-11.0	-0.893	
8	7.3	5.5	1.36	-10.8	-1.063	
9	9.2	6.9	1.40	-10.7	-1.371	
10	8.7	6.9	1.61	-8.9	-0.982	
11	6.0	4.5	1.63	-10.4	-0.439	
12	7.5	6.4	2.02	-6.9	0.089	
13	8.1	7.1	2.12	-9.9	-1.087	
14	5.7	5.7	2.48	-8.3	0.014	
15	8.8	8.1	2.81	-10.6	-1.289	
16	7.1	5.9	3.28	-6.8	1.089	
17	9.2	4.3	0.79	-8.9	-0.161	
18	9.3	4.0	0.81	-2.7	-0.135	
19	9.6	5.3	0.99	-9.3	-0.525	0.68
20	9.6	5.9	1.06	-13.7	-2.024	
21	5.1	3.6	1.19	-13.5	-0.274	
22	9.3	6.3	1.22	-13.3	-2.108	
23	9.0	6.5	1.39	-9.8	-0.795	
24	10.1	7.3	1.42	-12.6	-1.778	
25	8.8	6.0	1.52	-10.7	-0.840	
26	9.7	7.8	1.59	-8.2	-0.698	
27	4.8	3.9	1.60	-3.6	0.210	
28	9.0	6.9	1.81	-8.3	0.405	
29	8.4	5.9	1.97	-7.5	-0.113	
30	8.4	7.0	2.01	-9.8	0.188	
31	9.6	7.9	2.68	-11.0	-0.060	
32	7.5	6.7	3.23	-7.5	1.763	

Horikawa(1981)のものである。底面波動流速振幅は電磁流速計の出力から求めた。実験室での観察の結果、碎波点近傍の強い冲向き定常流の下では砂漣近傍の渦の作用による漂砂方向の逆転は起こっていない事が解ったので漂砂が Bed Load あるいは Sheet Flow として起こるものとしてこれらの漂砂量を半周期毎に用いた。実際の運動は Bed Load あるいは Sheet Flow 状態となっており、これらの漂砂量式は充分適用可能であると考えられる。結果として得られる流れによる岸沖漂砂量を前記実験 I の結果と同様に解析して示したのが図-7 である。すなわちここでは波による半周期毎の漂砂量を計算し、実験値からその値を引いて流れによる漂砂量を求めている。上記のいずれの漂砂量式でも傾向は変わらないが、Shibayama・Horikawa 式の方がデータの回帰線との相関がよいため図にはこちらを示してある。

図に示した式

$$\phi_{20} = 1.5 \theta_2^{1.6} \dots\dots\dots (6)$$

は今回のデータから求めた回帰式であり、図には香取らの式も示してある。図よりこの場合にも平面実験の場合と同様の関数関係で整理できるようである。ただし図中で中黒の点(2点)は岸沖の符号を反転して図に載せてあり、他の実験結果とは逸脱した結果となっている。この2点に付いて流速の時間変動を見ると、碎波の影響で時間波形が下に凸となっており、また碎波による乱れの影響も大きかった。この2点に付いては波による岸沖漂砂量式の適用に問題があるようである。

柴山ら(1983)はおもに砂漣が底面に形成される場合に付いて、還流装置付き二次元水路を用いて岸沖定常流の下での岸沖漂砂に付いて論じている。その際、主に砂漣近傍に形成される渦の作用で渦の中に取り込まれる浮遊砂の運動に注目して現象を説明しようとしている。しか

しながら特に今回の実験におけるような碎波点近傍では、底面軌道流速振幅が大きくなるために砂漣の消滅限界を越え、砂漣が形成されにくい点と、砂漣が形成されても流速場が対称振動流とは大きくずれるためにリズム的な渦の形成が起こらず、沖浜帯、あるいは碎波帯内の波が再生した一部の領域におけるように砂漣近傍の渦の作用に漂砂現象が大きく依存することはない。

4. 主要な結論

波流れ斜交場における沿岸漂砂と岸沖漂砂及び、強い底面冲向き定常流の下で岸沖漂砂に付いて底面流速の測定と漂砂量の測定を同時に行い、波流れの漂砂量を分離してそれぞれについて論じた。その結果従来から実験的裏付けが乏しいままに用いられてきた両者を線形的に足し合わせる方法が、かなりよい近似を与える事を実験的な裏付けと共に示した。また波流れ共存場での流れによる漂砂量の評価については香取ら(1983)の式で十分に評価できるようである。

参 考 文 献

- 香取完和・櫛山 勉・渡辺 晃 (1983): 定常流, 振動流交差装置による漂砂量測定, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 204~208.
- 柴山知也・渡辺 晃・堀川清司・小西 徹 (1983): 波流れ共存時の岸沖漂砂量, 第38回年譜要集第2部, pp. 187~188.
- Madsen, O. S. and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., pp. 1093~1112.
- Shibayama, T. and K. Horikawa (1985): A numerical model for two-dimensional beach transformation, Proc. JSCE, No. 357/II-3, pp. 167~176.
- Tanaka, H. and N. Shuto (1981): Friction coefficient of a wave-current coexistent system, Coastal Eng. in Japan, Vol. 24, pp. 105~128.