

前傾化した波と流れによるシートフロー漂砂量

高地 潤*・佐藤 慎司**・渡辺 晃**

加速度波形が岸向きと冲向きで非対称となる前傾化した波と流れによるシートフローに対して, 任意波形振動流装置実験により漂砂量を測定するとともに浮遊砂の輸送過程を分析した。前傾化した波のもとでは, 浮遊粒子の沈降に費やせる時間が岸向き時と冲向き時で異なるうえ, 境界層の特性も非対称となるため, 正味の漂砂量は岸向きとなる。全 52 ケースの移動床実験結果にもとづき, 前傾化した波と流れによるシートフロー漂砂量算定モデルを構築した。同モデルは加速度非対称性を有する振動流場と戻り流れを模擬した冲向き定常流共存場の広い範囲の条件に対して正味の漂砂量を精度よく算定できることが確認された。

1. はじめに

浅海域では, 波の有限振幅性により海底付近でも流速波形が非対称なものとなり, 正味の底質移動が生じることが知られている。流速振幅と周期が岸向きと冲向きで異なる条件での漂砂現象については, 多くの研究が実施され (例えば, 佐藤ら, 1985; Dibajnia・Watanabe, 1996), 砂漣上の砂移動量やシートフロー漂砂量の算定モデルが提案されている。なかでも Dibajnia・Watanabe (1996) のモデルは, 波と流れが重合する広い範囲の条件を対象とし, 混合粒径底質へも拡張されており (佐藤ら, 2000; Dibajnia ら, 2001a), 現地条件へも適用可能な実用的なモデルである。しかしながら, 実際の海岸で漂砂が活発な碎波帯では, 波の前傾化が顕著となり, 流速波形に加えて加速度波形も非対称な振動流が発達しているうえ, 戻り流れとして冲向きの定常流が重合している場合が多い。このような前傾化した波と流れのもとでの漂砂量については, 石田ら (1988) の実験的研究や Dibajnia ら (2001b) の研究があるものの, 現地条件に近い条件でのシートフロー漂砂を対象としたものは少ない。本研究では, 碎波帯でのシートフロー漂砂量に着目して, 流速波形として碎波点近傍での流速波形に相当する加速度非対称振動流及び戻り流れが重合した条件を用いた実験を実施し, 波の前傾性を考慮したシートフロー漂砂量算定式を提案することを目的とした。

2. 振動流装置による実験

2.1 加速度非対称波形

前傾化した波の流速波形は, 第一次近似のクノイド波理論の流速波形を加速度波形とみなして時間積分することにより再現し, 図-1 に示すような波形を得た。本研究ではこれを加速度非対称波形と呼ぶことにする。また, 流速波形の前傾度 α_{ju} を以下の式で定義する。

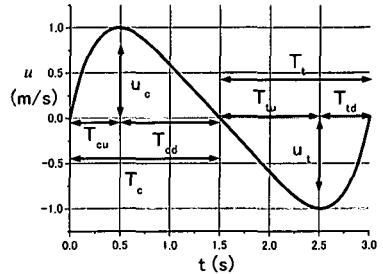


図-1 前傾化した流速波形例

$$\alpha_{ju} = \frac{T_{ju}}{T_j} \dots\dots\dots (1)$$

ここで添え字の j は c (岸向き時) または t (冲向き時) を表す。図-1 から明らかなように, 本研究で対象とする加速度非対称波においては以下の関係が成立する。

$$u_c = u_t, \quad T_c = T_t, \quad \alpha_{cw} + \alpha_{tw} = 1 \dots\dots\dots (2)$$

ここで, u_j は自乗平均流速振幅である。流れが重合した条件での前傾度は, 流れを加えた流速波形の岸向き, 冲向きそれぞれについて定義することにし, これを波のみの場合と区別して α_j と表すことにする。

2.2 実験ケース

中央粒径 $d = 0.20 \text{ mm}$ と 0.74 mm の均一砂を 2 種使用し, 周期 $T = 3.0 \text{ s}$ と 5.0 s の加速度非対称波形を用いた。波形の前傾度は $\alpha_{cw} = 0.453, 0.40, 0.32$ の 3 種類, 最大流速を $u_{\max} = 0.71 \sim 1.6 \text{ m/s}$ の範囲とし, これに流速 $U = 0, -0.1 \text{ m/s}, -0.2 \text{ m/s}$ (岸向きを正) の定常流を加えた。以上の条件で, 観測部中央における砂の移動量を計測するとともに, 高速ビデオカメラ (400 コマ/秒) により現象を記録した。正味の漂砂量 Q (岸向きを正) は, 中央断面左右の砂の質量の増減より算出した。表-1 に実験条件と次式で定義される無次元漂砂量 ϕ を示す。

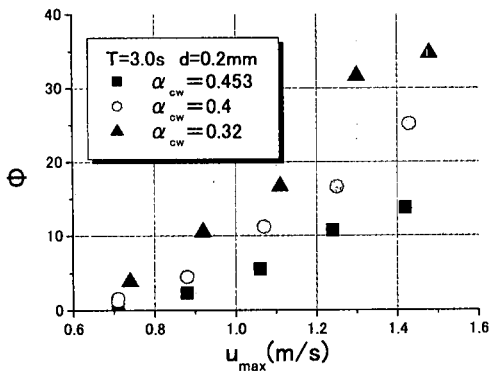
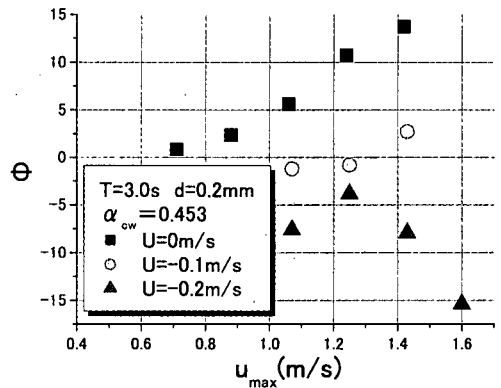
$$\phi = \frac{Q}{w_0 d} \dots\dots\dots (3)$$

ここで, w_0 は底質の沈降速度である (細砂で $w_0 = 2.3 \text{ cm/s}$, 粗砂で $w_0 = 10.0 \text{ cm/s}$)。また, 図-2, 3 に漂砂量測定結果の一部を示す。最大流速が大きくなるほど, ま

* 修(工) (前) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
** 正会員 工 博 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻

表-1 実験条件と無次元漂砂量の実測値

case	d (mm)	T (s)	U (m/s)	u_{max} (m/s)	α_{cw}	振動流の 作用時間 (s)	Φ
1	0.2	3	0	1.06	0.453	101	5.6
2	0.2	3	0	1.3	0.32	60	32
3	0.2	3	0	1.25	0.4	63	17
4	0.2	3	0	1.48	0.32	79	35
5	0.2	3	0	1.1	0.32	93	17
6	0.2	3	0	1.42	0.453	72	14
7	0.2	3	0	1.43	0.4	61	25
8	0.2	3	0	1.07	0.4	63	11
9	0.2	3	0	1.24	0.453	50	11
10	0.2	3	0	0.71	0.453	132	0.9
11	0.2	3	0	0.74	0.4	115	1.6
12	0.2	3	0	0.74	0.32	109	3.9
13	0.2	3	0	0.88	0.453	112	2.4
14	0.2	3	0	0.88	0.4	113	4.5
15	0.2	3	0	0.92	0.32	114	11
16	0.74	3	0	1.06	0.32	47	0.58
17	0.74	3	0	1.07	0.4	53	1.3
18	0.74	3	0	1.1	0.453	49	1.3
19	0.74	3	0	1.42	0.32	51	0.10
20	0.74	3	0	1.43	0.4	51	0.64
21	0.74	3	0	1.48	0.453	51	2.2
22	0.2	5	0	0.86	0.453	70	0.97
23	0.2	5	0	0.86	0.4	100	0.71
24	0.2	5	0	0.86	0.32	100	-0.63
25	0.2	5	0	1.45	0.453	50	31
26	0.2	5	0	1.44	0.4	50	20
27	0.2	5	0	1.44	0.32	50	5.7
28	0.2	5	0	1.27	0.453	50	16
29	0.2	5	0	1.26	0.4	50	6.5
30	0.2	5	0	1.26	0.32	50	2.9
31	0.2	5	0	1.09	0.453	50	6.7
32	0.2	5	0	1.09	0.4	50	3.1
33	0.2	5	0	1.09	0.32	55	0.29
34	0.2	3	-0.2	1.25	0.32	63	-3.8
35	0.2	3	-0.2	1.25	0.4	30	-1.4
36	0.2	3	-0.2	1.25	0.453	30	11
37	0.2	3	-0.2	1.07	0.32	30	-7.6
38	0.2	3	-0.2	1.07	0.4	30	-0.44
39	0.2	3	-0.2	1.07	0.453	33	6.8
40	0.2	3	-0.2	1.43	0.32	51	-7.9
41	0.2	3	-0.2	1.43	0.4	45	8.8
42	0.2	3	-0.2	1.43	0.453	30	17
43	0.2	3	-0.1	1.25	0.32	27	0.96
44	0.2	3	-0.1	1.25	0.4	30	9.9
45	0.2	3	-0.1	1.25	0.453	30	17
46	0.2	3	-0.1	1.07	0.32	30	-1.2
47	0.2	3	-0.1	1.07	0.4	30	2.6
48	0.2	3	-0.1	1.07	0.453	30	8.2
49	0.2	3	-0.1	1.43	0.32	30	2.7
50	0.2	3	-0.1	1.43	0.4	30	14
51	0.2	3	-0.1	1.43	0.453	30	31
52	0.2	3	-0.2	1.6	0.453	30	-15

図-2 実験結果 ($T=3$ s, $d=0.2$ mm, $U=0$ m/s)図-3 実験結果 ($T=3$ s, $d=0.2$ mm, $\alpha_{cw}=0.453$)

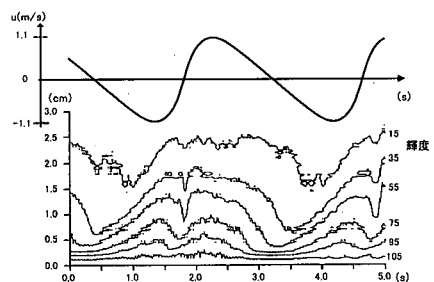
た前傾度が増すほど岸向き漂砂量が増える傾向が確認できる。

2.3 浮遊砂の輸送形態

加速度非対称波のもとでの砂の移動機構を把握するために、高速ビデオカメラの画像を PC に取り込み、浮遊砂濃度の時空間変化を追跡した。

図-4 にケース 5 の平均輝度の時空間分布を示す。横軸は時間、縦軸は砂面からの高さを示し、上段には主流部の流速波形を示してある。浮遊砂の舞い上がり高さは、岸向き・沖向きともにほぼ等しく、流速が最大となる位相付近で最も高くなっている。流速反転時については、岸から沖への反転時にはほとんどの砂が沈降しているのに対し、沖から岸への反転時には、高濃度の浮遊砂が維持されている。このように減速時の時間の大小が浮遊砂の沈降過程に大きな影響を与えており、これが正味の岸向き漂砂を生み出す一つの要因と考えられる。

さらに定常流 $U=-0.2$ m/s を加えたケース 38 の平均輝度の時空間分布を図-5 に示す。定常流を加えたことにより、 u_c は約 20% 小さくなり、岸向き最大流速時の舞い上がり高さはかなり減少すると予想されるが、岸向き流速時にも高い浮遊砂濃度が維持されていることがわかる。沖向き流れが重合する条件で岸向き流速時に高濃

図-4 砂の舞い上がりの様子 ($\alpha_{cw}=0.32$, $U=0$ m/s)

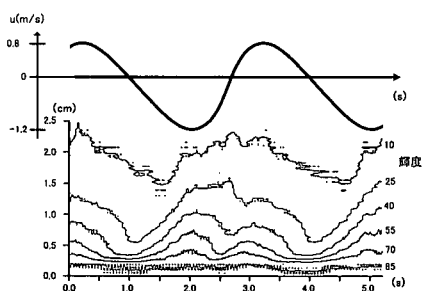


図-5 砂の舞い上がりの様子 ($\alpha_{cw}=0.4$, $U=-0.2$ m/s)

度の浮遊砂雲が形成されることは、流速非対称波を対象とした渡辺ら (2001) の実験でも確認されており、加速度非対称波条件においても同様の事実が確認された。

3. Dibajnia らによる漂砂量算定式

Dibajnia ら (2001b) は主として流速非対称な条件の実験データに基づき、以下の漂砂量算定式を提案した。

$$\phi = \frac{q}{w_0 d} = 0.0019 \frac{u_c T_c (\Omega_c + \Omega'_c) - u_t T_t (\Omega_t + \Omega'_c)}{(T_c + T_t) \sqrt{sgd}} \quad (4)$$

$$\omega_j = (\theta_j - \theta_{cr}) \frac{d}{w_0 T_j} \quad (5)$$

$$\theta_j = \frac{1}{2} \frac{u_j^2}{sgd} = \frac{\Psi_j}{f_w} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \omega_j \leq \omega_{cr} \\ \omega_j > \omega_{cr} \end{cases} \begin{cases} \Omega_j = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d}} \\ \Omega'_j = 0 \\ \Omega_j = [\omega_{cr} + (1 - \gamma_j)(\omega_j - \omega_{cr})] T_j \sqrt{\frac{sg}{d}} \\ \Omega'_j = \gamma_j (\omega_j - \omega_{cr}) T_j \sqrt{\frac{sg}{d}} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 s は砂の水中比重、 g は重力加速度、 f_w は底面摩擦係数、 ω_{cr} は底質の移動しやすさを規定するパラメーター ω_j の臨界値であり、シートフロー時において $\omega_{cr} = 1.2$ である。また、 γ_j は加速度非対称度を表現するパラメーターであり、流速波形の前傾度を用いて算出できる。

渡辺ら (2001) は、大流速の振動流と定常流が重合する条件における漂砂量を算定する際には、振動流の流速振幅を修正する必要があることを見出した。本研究では、渡辺ら (2001) のデータと本研究のデータを合わせて再整理し、波・流れ共存場では岸向きの流速値を以下のように修正して用いることにした。

$$u_{cc} = u_c (1 + 0.023 \sqrt{u_c \cdot |U|} / w_0) \quad (8)$$

Dibajnia ら (2001b) のモデルによる計算値を実験値と

比較すると、図-8~13 に示すように計算値は岸向きへの漂砂量を過小評価していることがわかった。よって、加速度非対称波の特徴に基づいて漂砂量算定式を修正することにした。

4. 漂砂量算定式の提案

4.1 加速度非対称振動流の特徴と砂移動過程

図-6 は加速度非対称な振動流について、境界層内の流速分布を模式的に示したものである。加速度波形が非対称な振動流では、流速が沖から岸へと変化する期間と岸から沖へと変化する期間とで見かけの周期が異なるため、両期間で実質の境界層厚さも変化する。そのため、底面極近傍の水粒子速度は非対称なものとなり、それに伴い底面摩擦応力や浮遊粒子の軌跡も非対称となる。これらの境界層の特性変化に起因する特徴に加えて、前節で指摘した浮遊砂の沈降に費やせる時間の違いが加速度非対称波の特徴である。すなわち、a) 流速と底面摩擦応力の変化、b) 沈降に費やせる時間の変化、c) 浮遊粒子の移動距離の変化を適切にモデル化することにより、加速度非対称な条件にも適用可能な漂砂量モデルを構築することができる。

a) 流速と底面摩擦応力の変化

図-7 に岸向き最大流速時の平均輝度分布を示す。加速度非対称性が増し α_c が小さくなると、岸向き最大流速時の浮遊砂舞い上がり量は増加することがわかる。佐藤

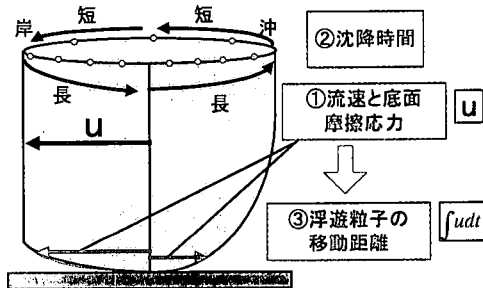


図-6 加速度非対称振動流の特徴

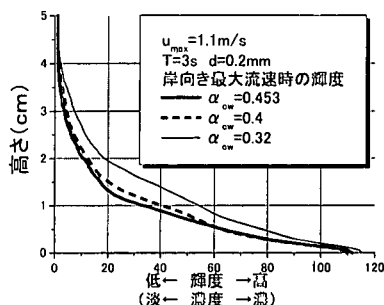


図-7 岸向き流速最大時の輝度の鉛直分布

ら (1996) によると, 前傾化した波においては底面摩擦応力が対称な条件に比べて変化し, 流速波形の前傾度 α_j を用いて表すと, 層流条件では岸向き流速時には底面摩擦応力が $(1/2\alpha_c)^{0.5}$ 倍になる。境界層の特性が変化することにより, 底質の移動を支配する底面近傍の流速値も変化すると考えられるため, 漂砂量算定式で用いる流速値も以下のように修正するのが適当である。

$$u_c' = \frac{u_c}{\sqrt{2\alpha_c}} \quad u_t' = \frac{u_t}{\sqrt{2\alpha_t}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これにより, 例えば Ω_c は

$$\Omega_c = \omega_c T_c \sqrt{\frac{sg}{d}} \frac{1}{2\alpha_c} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で算出することにする。

図一7をさらに注意深く見ると, 浮遊砂濃度分布の変化に伴い, 浮遊砂粒子の平均舞い上がり高さも変化することがわかる。つまり浮遊砂層の上縁として定義した舞い上がり高さは先に述べたとおり岸向き流速時と沖向き流速時とではほぼ同じであるが, 岸向き流速時には底面近傍の濃度が高くなるため, 加重平均した平均舞い上がり高さは対称な条件より小さくなる。このように平均的な舞い上がり高さの変化も前傾度により変化すると考えられるので, 例えば岸向き最大流速時の舞い上がり高さは対称波の場合の $(1/2(1-\alpha_c))^\beta$ 倍となるとしてモデル化した。無次元定数 β の値については, 本来浮遊砂濃度分布の計測値から同定されるべきものであるが, 本研究では画像輝度を浮遊砂濃度に変換するまでには至らなかったため, 漂砂量の計測値とモデルの予測値との対応が良くなるように決定することとし, $\beta=0.5$ とした。

b) 沈降に費やせる時間の変化

2.3節で述べたように, 1度舞い上げられた砂が沈降に費やせる時間は図一1に示すように T_{ca} 及び T_{ta} である。そこで, 例えば ω_c の評価に用いる沈降時間の代表値としては, T_c ではなく $(2T_{ca})$ を用いるのが適切である。また, a) で述べたように浮遊砂の平均舞い上がり高さも変化しているので, a) で述べた修正を合わせて導入すると結局 ω_j は以下のように修正される。

$$\theta_j' = \frac{u_j'^2}{2sgd\sqrt{2(1-\alpha_j)}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\omega_j' = (\theta_j' - \theta_{cr}) \frac{d}{w_0 2 T_{jd}} = (\theta_j' - \theta_{cr}) \frac{d}{w_0 2 (1-\alpha_j) T_j} \quad \dots\dots\dots (12)$$

c) 浮遊砂の移動距離の変化

境界層内での流速の変化に伴い, 浮遊砂の移動距離にも加速度非対称度の影響を考慮する必要がある。Dibajnia ら (2001b) のモデルでは浮遊砂の移動距離の影響は, Ω_j から Φ を評価する際に代表的な移動距離 $u_j T_j$ を乗じることと考慮されている。加速度非対称波では, 移動距

離の評価にも前傾度の影響を考慮した流速値 u_j' を用いて $u_j' T_j$ で評価すれば良い。ただし, 流速反転後に逆向きに輸送される成分を表す Ω_j' については, 流速が反転した時に既に浮遊状態にある砂の輸送を対象とするので, その移動距離を評価する上では, 反転時直後の流速値が大きく影響する。すなわち, Ω_c' の輸送に関する移動距離は大きいのに対し, Ω_c' のそれは小さい。よって, これらの違いを次のようにモデル化することにした。

$$\left. \begin{aligned} \Omega_c' &: u_t' T_t - 2(1-\alpha_t) u_t' T_t \\ \Omega_c' &: u_c' T_c - 2(1-\alpha_c) u_c' T_c \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

4.2 加速度非対称振動流に対する漂砂量算定式

Dibajnia ら (2001b) のモデルを修正する形で加速度非対称波に適用可能なモデルを提案する。式 (12) で評価した ω_j' の値に応じて式 (14) で Ω_j, Ω_j' を計算し, 式 (16) を用いて正味の無次元漂砂量 Φ を計算する。

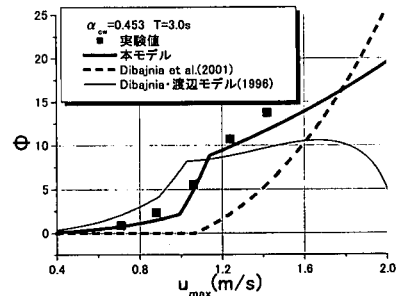
$$\omega_j' \leq \omega_{cr} \begin{cases} \Omega_j = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d}} \frac{1}{2\alpha_j} \\ \Omega_j' = 0 \end{cases} \quad \omega_j' > \omega_{cr} \begin{cases} \Omega_j = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d}} \frac{1}{2\alpha_j} \frac{\omega_{cr}}{\omega_j} \\ \Omega_j' = \omega_j T_j \sqrt{\frac{sg}{d}} \frac{1}{2\alpha_j} \frac{\omega_j' - \omega_{cr}}{\omega_j'} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$u_j' = \frac{u_j}{\sqrt{2\alpha_j}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

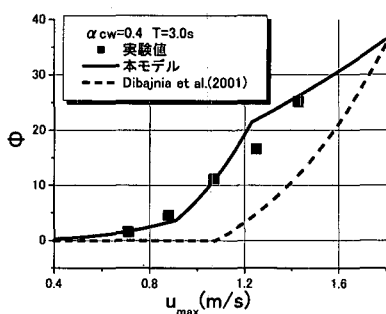
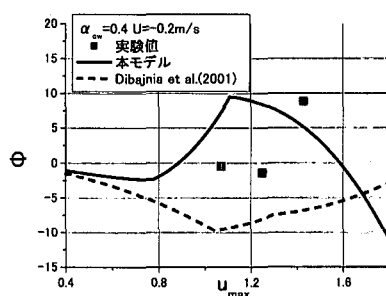
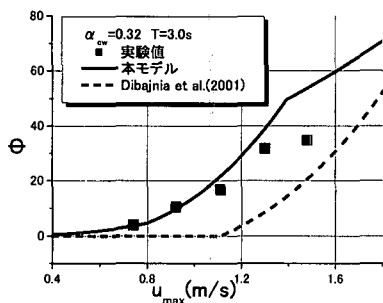
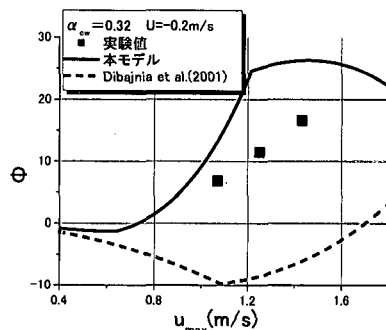
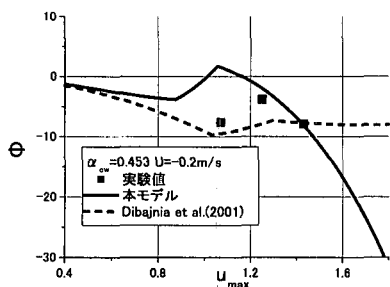
$$\Phi = 0.0019 \frac{u_c' T_c [\Omega_c + \Omega_c' \times 2(1-\alpha_c)] - u_t' T_t [\Omega_t + \Omega_t' \times 2(1-\alpha_t)]}{(T_c + T_t) \sqrt{sgd}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

ここで, 式 (14) の右辺すぐの ω_j は ω_j' ではなく, 式 (5) で計算されるものであることに注意が必要である。上述の式は, 加速度波形が対称な振動流 ($\alpha_j=0.5$) に対しては, Dibajnia ら (2001b) の算定式で γ_j を 1 とした場合と完全に一致する。

図一8~13に Dibajnia らのモデルと本モデルの計算結果を示す。加速度非対称波形の特徴を取り込むことにより実験値を精度良く表現していることがわかる。同様



図一8 実験値との比較 ($\alpha_{cw}=0.453$)

図-9 実験値との比較 ($\alpha_{cw}=0.4$)図-12 実験値との比較 ($\alpha_{cw}=0.4$, $U=-0.2$ m/s)図-10 実験値との比較 ($\alpha_{cw}=0.32$)図-13 実験値との比較 ($\alpha_{cw}=0.32$, $U=-0.2$ m/s)図-11 実験値との比較 ($\alpha_{cw}=0.453$, $U=-0.2$ m/s)

の考え方により Dibajnia・Watanabe モデル (1996) も修正したが、同修正モデルは図-8 に示すようにある一定流速を超えると急激に漂砂量が変化するため、大流速の条件への適用には問題があると考えられる。

5. おわりに

任意波形振動流装置を用いた波・流れ共存場での移動床実験にもとづき、前傾化した波と流れによるシートフロー漂砂量算定モデルを構築した。本モデルは加速度非対称性を有する振動流場と戻り流れを模擬する冲向き定常流共存場の広い範囲の条件に対して正味の漂砂量を精度よく算定できることを検証した。今後の課題として、本モデルの混合粒径砂に対する適用性の確認と、大型水

路等の現地スケールの実験結果との整合性を調べる必要がある。

参考文献

- 石田 昭・浅井 功・川谷正恭・喜岡 渉 (1988): 波動場の歪みを考慮に入れた岸沖漂砂量公式, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 312-316.
- 佐藤慎司・伊藤春起・渡辺 晃 (1985): 非対称振動流下における砂の移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 283-287.
- 佐藤慎司・田中茂信・野口賢二・加藤史訓 (1996): うねりによる長周期変動と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 101-111.
- 佐藤慎司・田中正博・樋川直樹・渡辺 晃・磯部雅彦 (2000): 混合砂の移動機構に基づくシートフロー漂砂量算定式の提案, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 486-490.
- 渡辺 晃・佐藤慎司・二宮 宗・高地 潤 (2001): 波・流れ共存場におけるシートフロー漂砂量の算定式, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 496-500.
- Dibajnia, M.・橋村嘉之・喜岡 渉 (2001a): 混合粒径漂砂量算定式の新たな提案, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 501-505.
- Dibajnia, M. and A. Watanabe (1996): A transport rate formula for mixed-size sands, Proc. 25 th Conf. on Coastal Engineering, pp. 3791-3804.
- Dibajnia, M., T. Moriya and A. Watanabe (2002b): A representative wave model for estimation of nearshore local transport rate: Coastal Engineering Journal, Vol. 43, No. 1, pp. 1-38.