

# 底質粒子特性に着目したシートフロー漂砂の実験資料解析

浅野敏之<sup>1</sup>・Abbas Yeganeh Bakhtiary<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 (〒890 鹿児島市郡元1-21-40)

<sup>2</sup>学生会員 工修 京都大学大学院博士後期課程 土木工学専攻 (〒606 京都市左京区吉田本町)

暴浪下の海底砂の移動形態であるシートフロー漂砂を実験室内で再現するために、これまで様々な人工粒子が用いられてきた。本研究は人工粒子を用いた場合の実現象との力学的等価性を既往の広範な実験結果の解析から検討したものである。まず、底質粒子の諸特性がどのようにシートフロー漂砂の力学機構に関与するかを議論した。次いで濃度分布・底質移動速度分布・漂砂量フラックス・シートフロー層厚に関して、底質粒子の特性による結果の相違について明らかにし、その相違の生じる力学機構について考察を行った。

**Key Words** : *sheet flow sediment transport, particle material effects, dispersive stress concentration profile, velocity profile, transport flux, sheet flow layer thickness*

## 1. 研究の目的

シートフロー漂砂は、大量の土砂が流送され顕著な海底地形変化を生じるため、工学的に重要であり最近多くの研究が行われるようになった。この現象を実験室内の振動流水槽内で再現するために、比重の小さな大粒径の人工粒子(以下単に人工粒子と呼ぶ)がしばしば使用されてきた。その理由の一つには人工軽量粒子の使用が計測や可視化に簡便さを提供することも挙げられよう。

しかし、人工粒子の使用の妥当性は、シールス数が同じであれば現地の暴浪下の自然砂で生じる現象と等価なものが再現される、という前提が正しいかどうかによって依っている。人工粒子と自然砂を用いた実験結果には系統的な相違が見られるようであるが、この問題を正面から検討した研究は見当たらない。

本研究は、これまで暗黙のうちに受け入れてきたこの仮定の妥当性を、広範囲にわたる実験条件・底質条件の下での既往の実験結果を整理・解析することによって検討したものである。まず、底質粒子の特性がどのように漂砂現象の力学機構に関与するかを、粒径、粒子形状、粒子の材料特性に分けて議論する。次いで濃度分布・底質移動速度の分布・漂砂量フラックスの分布・シートフロー層厚に対して底質粒子による結果の相違を明らかにし、この相違が発生する機構について力学的な検討を行う。

## 2. 底質粒子特性がシートフロー状底質移動に関するメカニズム

### (1) 粒径の効果

ここでは、粒径の異なる底質を用いた場合で次式で示すシールス数 $\Psi$ が等しい時、シートフロー漂砂のメカニズムが同じであるかどうかを多角的に検討する。

$$\Psi = 0.5 f U_0^2 / (s-1) g d \quad (1)$$

ここに、 $f$ は摩擦係数、 $U_0$ は境界層外縁での流速振幅、 $s$ は底質粒子の比重、 $g$ は重力加速度、 $d$ は粒径である。すなわち、問題は粒径 $d$ が0.03 cm、比重 $s = 2.65$ のような典型的な自然砂に対して生起しているシートフロー漂砂の現象を、異なる $d, s$ の値を持つ人工粒子で再現できるかである。

粒径 $d$ は平坦床では粗度高さを表し、摩擦係数 $f$ を支配する。したがって、異なる粒径の粒子を用いた場合には $f$ が $d$ の関数となることを考慮に入れて、両者のシールス数を同じにしてやればよい。しかしながら、最近 Sumer ら<sup>1)</sup>は、シートフロー状態においても浮遊砂が存在する場合と存在しない場合とで特性が異なり、摩擦則や流速分布がシールス数のみならず、沈降速度と摩擦速度の比 $w_0/u_*$ によって支配される事を報告している。すなわち、シール

ズ数が同じであっても、 $w\omega u_*$ が異なると両者の現象は同じにならないことになる。これは粒径によって渦や乱れに対する追従性が異なることに起因し、浮遊がシートフロー現象の一部として機能するならば、 $w\omega u_*$ の影響が現れてくる。

シートフロー漂砂に固有の力学機構はシートフロー層内部で発生する分散応力であるが、これが粒径に大きく依存することはきわめて重要である。Bagnold<sup>2)</sup>の実験によれば、集散的土砂移動の際に生じる分散応力 $\tau_G$ は次式のように粒径 $d$ の2乗に比例する。

$$\tau_G \sim \rho_S (\lambda d)^2 (\partial u / \partial z)^2 \quad (2)$$

ここに $\rho_S$ は底質粒子の密度、 $u$ は底質粒子の移動速度、 $\lambda$ は線形濃度である。上式によれば、粒径0.3mmの自然砂と粒径3mmの人工粒子を用いた場合とでは粒子間応力に100倍の差異が生じることになる。

さらに細部のメカニズムにわたって人工粒子を用いることが、自然砂に対して生起する現象と相違する要因を挙げると以下のようである。

土屋<sup>3)</sup>は掃流漂砂に関与する流れの加速度の効果を明らかにしたが、粒径が大きいほど振動流の加速期・減速期への追従性が悪くなるため、シートフロー状漂砂にも同様の効果が内在するものと考えられる。さらに、粒径が大きいほど空隙径も大きくなり、底面の透過性も増大する。粒状体にせん断力を作用させると、粒子群が下層の粒子群の突起を乗り越えることによって変形するが、その際に体積膨張が生じる。このダイレタンシー効果は、後述するように粒子密度が大きい領域での密度分布(濃度分布)に粒径による差異を与える。またシートフロー状態でも粒子は流体と粒子の相対速度の2乗に比例する抗力を受けるが、粒径が異なるためReynolds数が自然砂と人工粒子では同じとならず、抗力係数に差異を生じる。

## (2) 底質形状の効果

自然砂は一般に角張った形状を有しており、球形や円筒形の人工粒子とはこの点で異なっている。安息角 $\phi_s$ は粒子間の滑動摩擦角 $\phi_{sf}$ と粒子間のかみ合わせによる摩擦角 $\beta$ で構成される。人工粒子はプラスチックやガラス・セラミックなどで成形されており、表面が滑らかで $\phi_{sf}$ が小さい場合が多く、真球に近いのでかみ合わせ効果は無視できる。一方、円筒形などの人工粒子では $\beta$ が大きくなり、自然砂の運動機構とかけ離れたものとなる恐れがある。Horikawa et al.<sup>4)</sup>は自然砂を用いた実験からシートフローが発生する限界シールズ数を $\Psi = 0.5 \sim 0.6$ としたが、浅野<sup>5)</sup>の球状の人工粒子を用いた実験では $\Psi = 0.2$ 程度でも砂漣状の底面の凹凸は発生せず、粒子群もシートフロー

状に流送されることが観察された。これより粒子形状は、シートフローの発生限界などに大きな影響を与えることが予想される。

## (3) 底質の材料特性の効果

既往の実験では人工粒子として各種プラスチックやセラミックなど多様な素材が用いられている。この材質により粒子同士の衝突による運動量の伝達効率が異なることが予想される。Hanes-Inman<sup>6)</sup>が実験的に求めた固液混相体の分散応力の測定結果には粒子の反発係数 $e$ が含まれており、シートフロー層内の応力場が $e$ に依存することが考えられる。定常流下でのsaltation運動は反発係数 $e$ が場に入った形で記述される。後藤<sup>7)</sup>はシートフロー状態の砂粒子群の運動特性を解析するために、saltationのシミュレーションに粒子間相互の衝突を組み込んだ解析を行ったが、砂粒子の移動速度や存在確率密度等の結果が粒子の反発特性によって変化するであろうことは容易に推察できる。

これ以外にも、山下<sup>8)</sup>は底質の比重 $s$ の効果がシートフロー層内の流速分布に与える効果を検討し、シールズ数に含まれる $s$ だけでは結果を整理しきれないことを指摘している。

## 3. 解析に用いたデータセット

濃度分布・流速分布・漂砂量分布・移動層厚さに及ぼす底質粒子の影響を調べるため、既往の広範な実験データを整理・解析した。表-1は本研究で解析したデータセットをまとめたものである。解析データは自然砂を用いたものと人工粒子を用いたものに分かれ、ほとんどが正弦振動流の下で測定されたものであるが、RibberinkとAl-Salemの研究では<sup>16), 17), 18)</sup>、2次のストークス波で表される非対称な流速波形や、不規則な流速波形の下で測定が行われており、さらにRibberink et al.<sup>19)</sup>では流れが重畳された場合の測定がなされている。それぞれのデータセットの流れや底質に関する実験条件と、シールズ数 $\Psi$ および次式で記述されるmobility number $\Theta$ を表-2に示す。

$$\Theta = 0.5U_0^2 / (s-1)gd \quad (3)$$

ここに引用した研究では表中に示したものの以外の実験ケースもあるが、紙面の制約上以下の解析に用いたケースのみを示した。また、円筒形など球形以外の底質粒子を用いた実験もあるが、この場合に粒径をどのように決定したかは記述されていないため、原論文中に示された値をそのまま掲載した。表中には摩擦係数 $f$ も示したが、これは粗度高さ $r$ を粒径の2.5倍とし( $r = 2.5d$ )、以下に示すSwart<sup>20)</sup>の公式から求めたものである。

表一 本解析に用いたデータセット

Author(s) (year)	flow motion	particle material	particle shape
Horikawa et al. <sup>4)</sup> (1982)	sinusoidal	natural sand	
Yamashita et al. <sup>9)</sup> (1984)	sinusoidal	imitation pearl	spherical
Yamashita et al. <sup>10)</sup> (1985)	sinusoidal	imitation pearl	spherical
Yamashita et al. <sup>11)</sup> (1988)	sinusoidal	plastic i. pearl	cylindrical spherical
Yamashita et al. <sup>12)</sup> (1992)	sinusoidal	imitation pearl	spherical
Yamashita et al. <sup>9)</sup> (1993)	sinusoidal	plastic	spherical
Sawamoto - Yamashita <sup>13)</sup> (1986)	sinusoidal	ntrl. sand coal dust i. pearl	spherical
Ahilan - Sleath <sup>14)</sup> (1987)	sinusoidal	nylon P.V.C.	cylindrical cylindrical
Dick - Sleath <sup>15)</sup> (1991)	sinusoidal	acrylic nylon	subspherical cylindrical
Ribberink - Al-Salem <sup>16)</sup> (1990)	asymmetric	natural sand	
Al-Salem <sup>18)</sup> (1993)	asymmetric & sinusoidal	natural sand	
Ribberink et al. <sup>19)</sup> (1994)	sinusoidal + current	natural sand	
Asano <sup>20)</sup> (1995)	sinusoidal	i. pearl plastic	spherical spherical

$$f = \exp(5.213(r/A)^{0.194} - 5.977) \quad (4)$$

ここに  $A$  は水粒子軌道振幅である。この  $f$  は固定床に対するものであり、シートフロー状態の移動床流れへ適用できるかは不明であるが、この方面の理解が不足していることから  $\Psi$  には慣用的に  $f$  を計算し代入することにした。

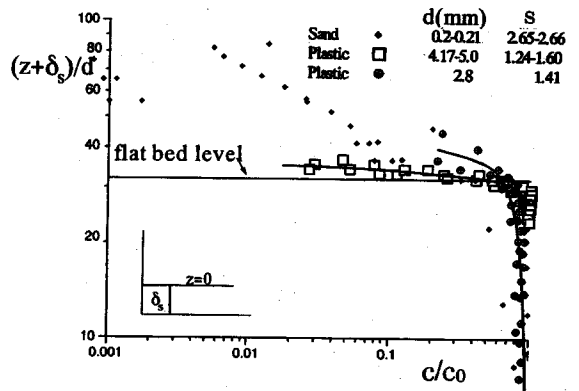
#### 4. 結果及び考察

##### (1) 濃度分布

図一1は Horikawa et al.<sup>4)</sup> (粒径  $d=0.20\text{mm}$ ) と Al-Salem<sup>18)</sup> (粒径  $d=0.21\text{mm}$ ) の自然砂を用いた位相平均濃度分布に関する実験結果、山下<sup>9), 10), 13)</sup> (粒径  $d=5.0\text{mm}$ ) と Asano<sup>20)</sup> (粒径  $d=4.17\text{mm}$ ) の大粒径の人工粒子を用いた結果、さらに山下<sup>11), 12)</sup> の中程度の粒径( $d=2.8\text{mm}$ ) を持つ人工粒子の結果を、粒径のグ

表二 各データセットの実験条件

Author (first)	Case	s	d (mm)	T (s)	$U_0$ (cm/s)	f	Mobility No. (θ)	Shields No. (ψ)
Horikawa (1982)	I-1	2.66	0.20	3.6	127	0.009	496.73	2.236
A. Al-Salem (1993)	C1	2.65	0.21	6.5	85.5	0.0088	215.28	0.949
	C2	2.65	0.21	9.1	85	0.0081	212.77	0.858
	C3	2.65	0.21	7.2	171	0.0073	861.12	3.14
Yamashita (1984)	3	1.60	5	3.8	101.5	0.0294	35.04	0.515
Yamashita (1985)	1	1.58	5	3.1	94	0.0337	31.09	0.523
	2	1.58	5	3.1	80.6	0.0364	22.86	0.416
	3	1.58	5	3.1	67.6	0.0399	16.08	0.321
	4	1.58	5	3.1	53.9	0.0452	10.22	0.231
Sawamoto (1986)	4	1.60	5	3.8	88.7	0.0313	26.76	0.419
Yamashita (1988)	4	1.41	2.8	3.5	89	0.0247	70.40	0.871
Yamashita (1992)	A	1.41	2.8	1.3	43.7	0.0601	16.97	0.514
	B	1.41	2.8	2.3	65	0.0350	37.55	0.658
	C	1.41	2.8	5.5	135.2	0.0174	162.47	1.416
Ahilan (1987)	2	1.137	4	3.7	45	0.0403	37.71	0.759
	5	1.137	4	3.6	31.5	0.0497	18.48	0.459
	9	1.44	4.3	4.9	122	0.0226	80.27	0.907
Asano (1995)	C1	1.24	4.17	4.6	92.6	0.0257	87.43	1.122
	C2	1.24	4.17	4.6	85	0.0267	73.66	0.984
	C4	1.24	4.17	4.3	63.7	0.0318	41.37	0.657
Ribberink (1994)	E1	2.65	0.21	7.2	160	0.0073	901.88	2.790



図一1 自然砂と人工粒子の濃度分布の比較 (位相平均濃度)

ループに分けてプロットしたものである。

振動流を作用する前の底質表面の位置を  $z=0$  としているが、測定結果はシートフロー層内部 ( $z < 0$ ) についても得られており、ここでは全領域を対数軸上で表示するために、

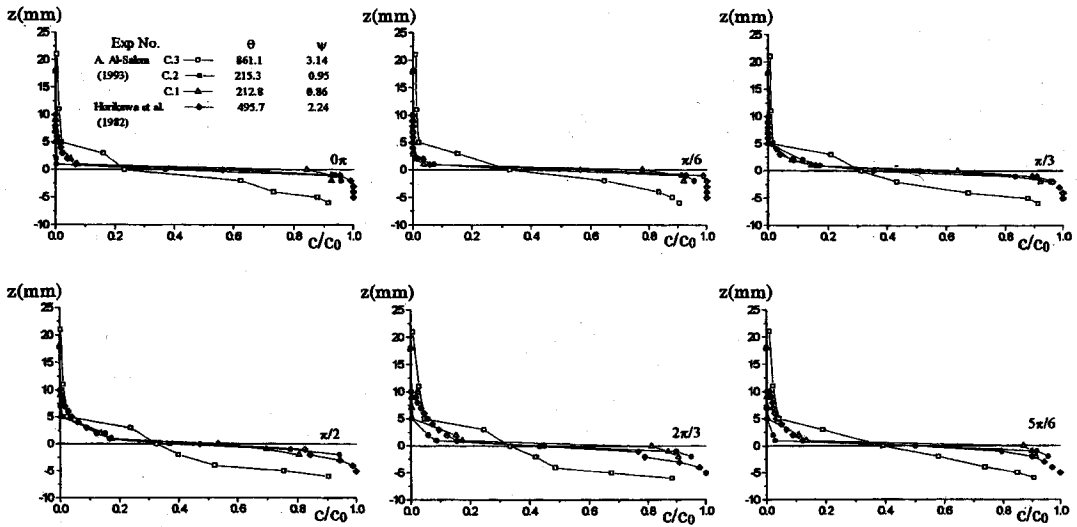


図-2 自然砂実験における濃度分布の位相変化

$z$  に後述するシートフロー層厚の静的厚さ  $\delta s$  を加えて、粒径  $d$  で無次元化したものを縦軸にとった。横軸の濃度  $c$  は振動流を作用させる前の底質層内の充填濃度  $c_0$  で無次元化されている。

プロットされたデータのシールズ数は同じではないが、粒径グループ毎に同様な分布形を示すことがわかる。すなわち、自然砂の結果では  $z > 0$  の領域でかなり上方まで濃度の値を有するのに対し、人工粒子の結果では  $z > 0$  で急速に濃度を減少させる結果となっている。この領域では自然砂は水流の乱れ応力によって上方に支持されるが、粒径が乱れや渦径に比して大きくなるとともに、その機構が働かなくなるためと考えられる。また人工粒子の分布形は全領域で上に凸となっているが、自然砂では  $z > 0$  では下に凸の形状が、 $z < 0$  では上に凸へと変化している。Ribberink et al.<sup>19)</sup> は自然砂を使った濃度分布から、シートフロー状態の流れ場が、pick-up layer, sheet-flow layer, suspension layer の3つの階層から成る底質混合の力学構造を持つことを指摘している。

図-2は図-1で黒丸で示した自然砂のデータのみを横軸を変化させて示したものである。Al-Salem<sup>18)</sup> のC3のデータを除き、ほぼ一致した濃度分布を示すことがわかる。すなわち、 $z > 0$  では下に凸、 $z < 0$  では上に凸の分布形で、 $z > 0$  の分布形は通常の浮遊砂の濃度分布とほぼ同じものとなる。これは  $z > 0$  では底質粒子は乱れによって上方に支持されていることを示唆している。なお、Al-SalemのC3のデータは流速がきわめて大きいため底面に擾乱が発生したためか、やや乱れた分布形となっている。

図-3は人工粒子を用いた実験結果である。シールズ数の範囲は0.5~1.1程度で図-2の約1/2ではあるが、粒径は

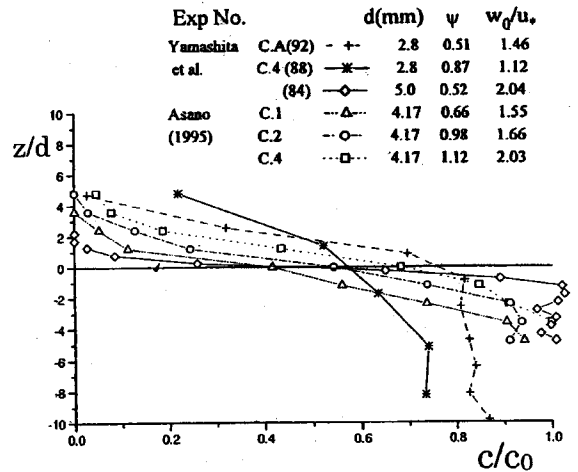


図-3 人工粒子についての濃度分布とシールズ数の関係

10倍程度のものである。図より  $z > 0$  の領域での濃度分布は図-2とは異なり、やや上に凸の形状となっている。これは人工粒子の粒径が自然砂より顕著に大きく分散応力が增大するため、上方の粒子を支持する機構が水流の乱れ応力から分散応力に変化するためと考えられる。また、 $z=0$  付近の無次元濃度  $c/c_0$  は0.5より大きい値を取るようであるが、これは粒子が下方の粒子層の突起を乗り越えることによるダイレイタンスの発生によって、静止時には  $z < 0$  にある粒子群が運動時には膨張して  $z > 0$  の範囲に入り込むことが考えられる。Asanoのデータ群と山下らのデー

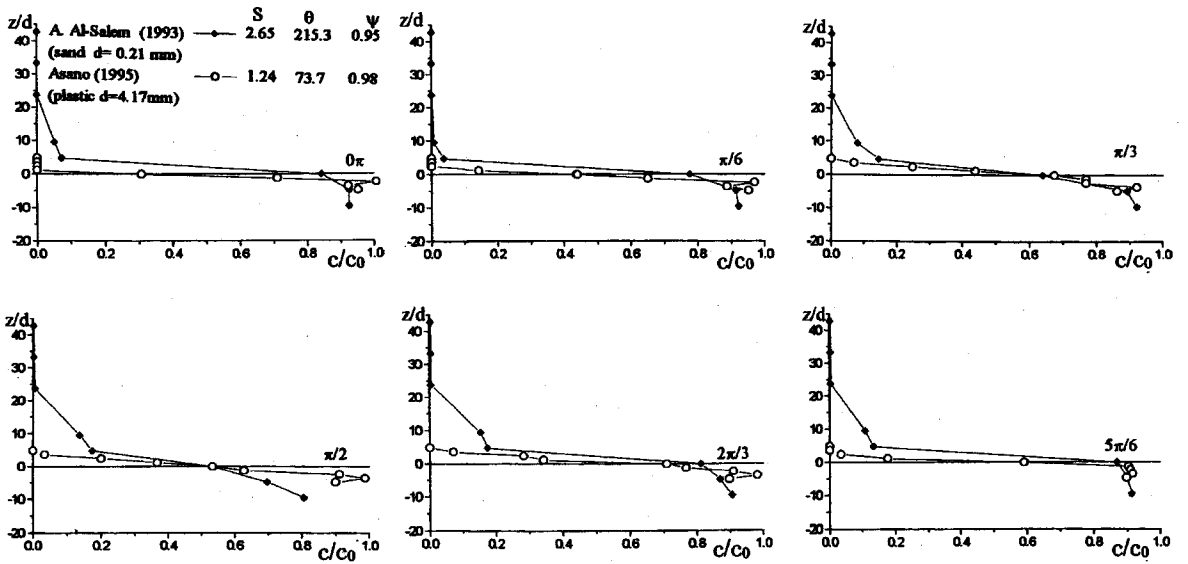


図-4 自然砂と人工粒子の濃度分布の比較

	d(mm)	s	Ψ
Oscillatory flow & Current	0.21	2.65	2.790
Pure Oscillatory flow	0.20	2.66	2.236

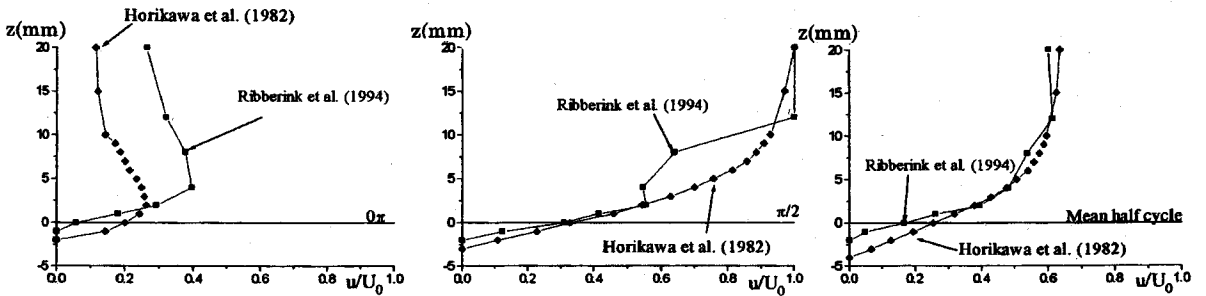


図-6 自然砂を用いた実験での底質移動速度の鉛直分布

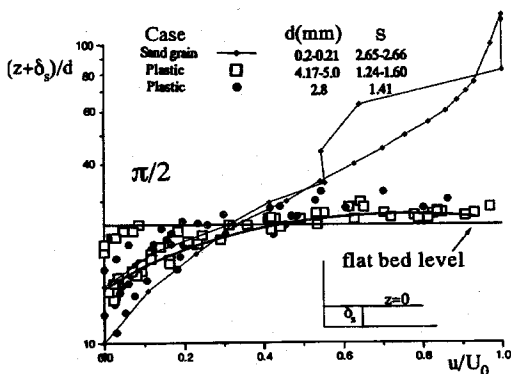


図-5 底質移動速度の鉛直分布

夕群を別々に調べると、シールズ数が大きいほど濃度は  $z>0$  の上方まで大きくなる。

図-4はシールズ数がほぼ同一の Al-Salem の C3 のケースと Asano の C2 のケースの位相毎の濃度分布を比較したものである。縦軸の  $z$  座標を粒径  $d$  で無次元化しても粒径の影響は残り、自然砂と人工粒子とでは濃度分布が広がる範囲、分布形の形状ともに大きな違いがある。すなわち、人工粒子の濃度変化は静水時の底質層表面付近のごく薄い層で起こることがわかる。

## (2) 底質粒子速度分布

図-5は、図-1と同様に自然砂と人工粒子のグループに分けて、振動流の位相  $\pi/2$  における底質移動速度の分布を示したものである。図-1と同様、振動流を作用させ

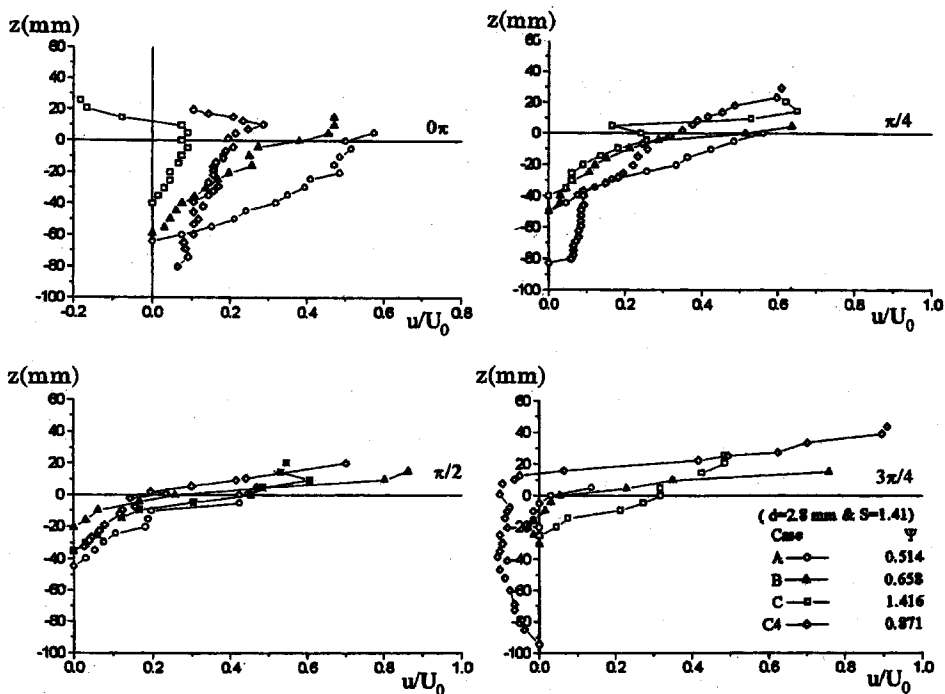


図-7 人工粒子を用いた実験での底質移動速度の鉛直分布 (山下ら<sup>11)</sup>)

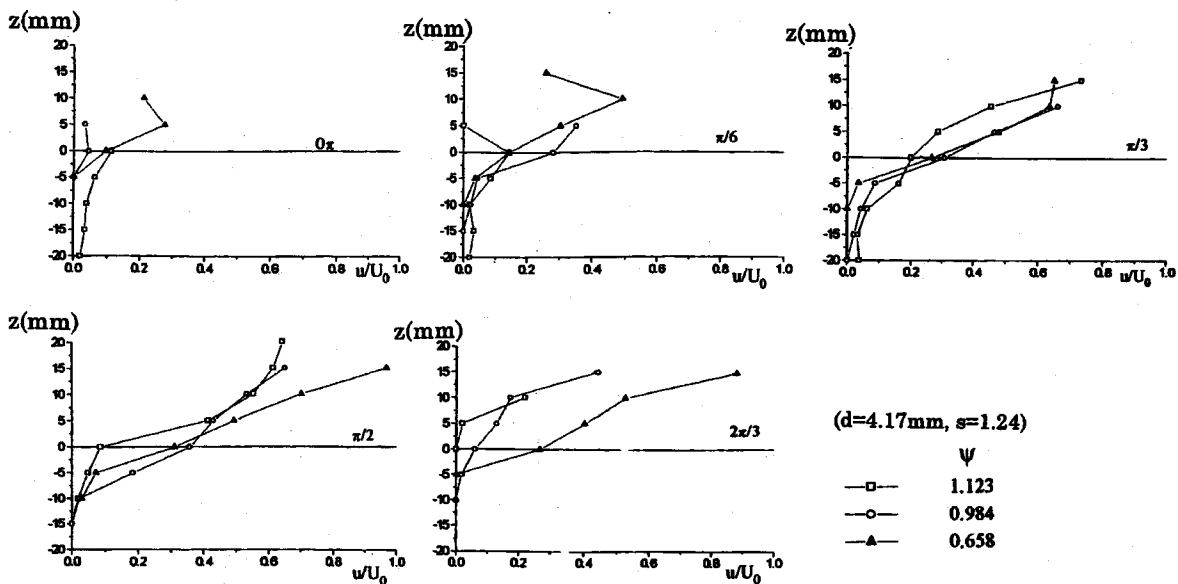


図-8 人工粒子を用いた実験での底質移動速度の鉛直分布の比較 (Asano<sup>20)</sup>)

る前の底質表面位置  $z=0$  を挟んで上・下層を対数軸上で表示するため、 $z$  にシートフロー層厚  $\delta_s$  を加え、粒径  $d$  で無次元化したものを縦軸にとった。自然砂を用いた結果は人工粒子を用いた結果と大きく異なることがわかる。すなわち、自然砂の結果が  $z > 0$  の広い範囲で流速が変動し、 $z > 0$  では下に凸の形状で主流流速に至るのに対し、人工粒子では変動範囲が狭く、分布形も上に凸の形状となる。

図-6は自然砂を用いた Horikawa et al.<sup>4)</sup> と Ribberink et al.<sup>19)</sup> の底質移動速度の鉛直分布を比較したものである。し、Horikawa et al.の結果は正弦振動流の下での測定果であるのに対し、Ribberink et al.のものは一方向の流れが重なっている。しかし、このケースでは波の流速振幅が  $U_0 = 160 \text{ cm/s}$  に対し、流れの流速は  $U_c = 15 \text{ cm/s}$  であり、流れの影響は小さい。位相  $0\pi$  の結果は振動流流速が  $0$  とな

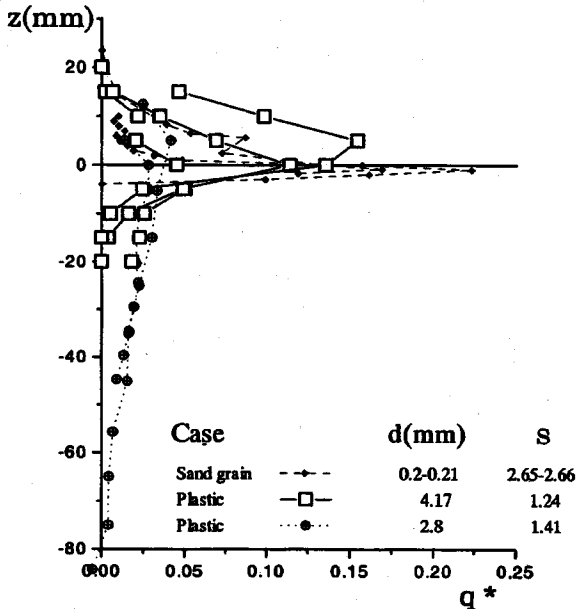


図-9 漂砂量フラックスの鉛直分布

る位相であるため両者は異なる分布形となるが、最大流速時の位相 $\pi/2$ の結果および半周期平均流速の結果では両者はほぼ同じ分布形となることがわかる。

人工粒子の結果について、山下ら<sup>11), 12)</sup>, Asano<sup>20)</sup>の速度分布の位相変化を示したものがそれぞれ図-7, 図-8である。流れの非定常性の効果や粒子の流体運動への追従性の相違が関与し、各瞬間毎には粒子速度の分布は同じ形状とならないことがわかる。しかし、最大位相時 $\pi/2$ ではほぼ同じ形状となり、上に凸の分布形が得られる。

### (3) 漂砂量フラックス

漂砂量フラックス  $q$  は底質濃度  $c$  と移動速度  $u$  の積で計算される。ここでは  $q$  の無次元量として振動流の流速振幅  $U_0$  で除した  $q^* = c u / U_0$  で結果を表示する。図-9は半周期間で位相平均した漂砂量フラックスの結果を示したものである。図より自然砂の場合は漂砂量フラックスのピークは  $z=0$  よりやや下方に存在するのに対し、人工粒子の場合は  $z=0$  のやや上方に位置することがわかる。これは底質濃度が人工粒子の場合には  $z>0$  の領域でも指数関数的に減少せず、薄い範囲ではあるが大きな濃度を保持していることに起因するためと考えられる。

図-10は自然砂を用いた実験ケースである Horikawa et al.の結果と Ribberink et al.の結果を比較したものである。図-6の結果と同様、位相  $0\pi$  では外縁の振動流流速が0となる位相であるため、後者の結果に流れの効果が相対的に大きく含まれる。

この位相では Horikawa et al.の結果では  $z<0$  にピークが

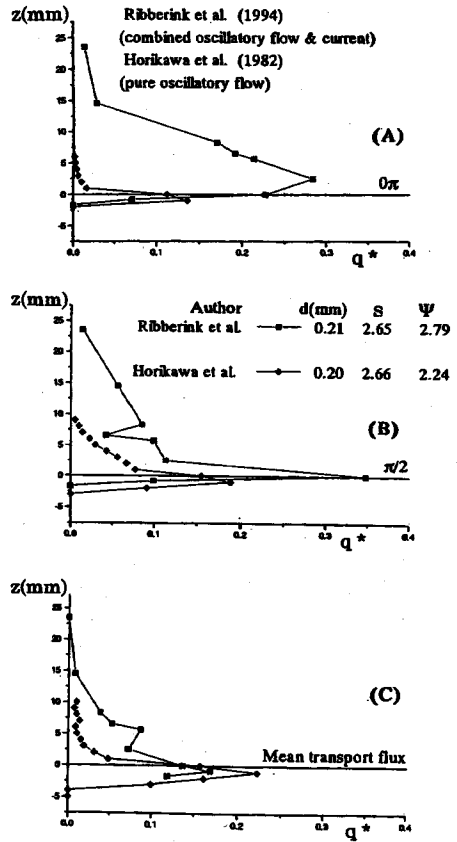
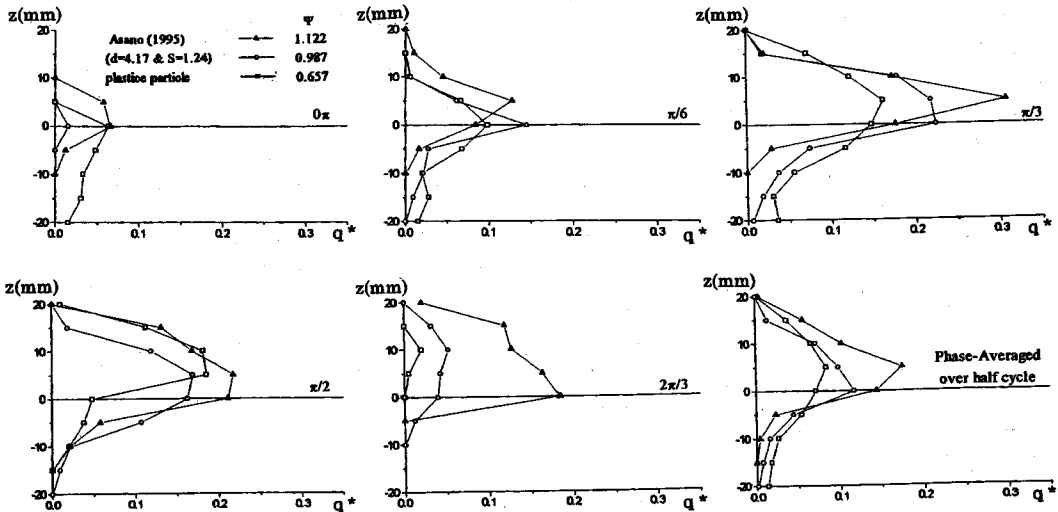


図-10 自然砂に対する漂砂量フラックスの分布

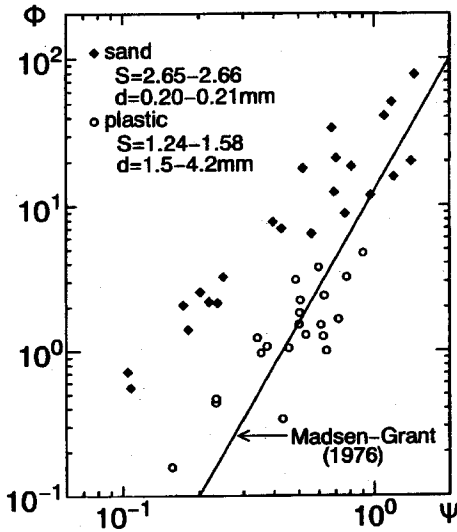
存在するが、流れが重なった Ribberink et al.の結果では  $z>0$  にピークが移り絶対値も大きくなる。しかし、振動流の外縁流速が最大となる位相 $\pi/2$ では Ribberink の結果もピークの位置は  $z=0$  付近に移動する。位相平均値で表した図(c)では両者とも漂砂量フラックスのピークは  $z<0$  に位置し、その分布形もよく似た結果となることがわかる。

図-11は、Asano<sup>20)</sup>による人工粒子を用いた漂砂量フラックスの鉛直分布の結果である。それぞれの位相で漂砂量フラックスは  $z=0$  より上方でピークを取ることがわかる。また振動流が最大となる $\pi/2$ の位相では実験ケースによらずほぼ同一の分布形となるようである。

図-12は無次元半周期漂砂量  $\phi = Q / w_0 d$  とシールズ数の関係を自然砂と人工粒子に分けて示したものである。自然砂の方が同じシールズ数では半周期漂砂量が大きくなることわかる。なお、Asano は移動床に対して物理性の不明確な摩擦係数を含まない mobility number  $\Theta$  で整理すれば、ここでの  $\phi$  に関する自然砂と人工粒子との結果の相違が小さくなり、 $\phi$  は  $\Theta$  の 1.5 乗で良く整理できることを示している。



図—11 人工粒子に対する漂砂量フラックスの分布

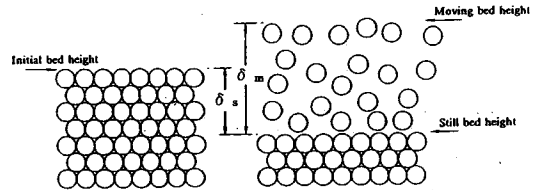


図—12 無次元漂砂量とシールス数の関係

#### (4) 移動層厚さ

ここでは移動層厚さとして、静止状態の底質層がどの深さまで移動するかという静的な厚さ  $\delta s$  と、移動状態の底質厚さ  $\delta m$  の両者 (図—13) について検討した。

図—14は  $\delta s$ 、 $\delta m$  および両者の比  $\delta s / \delta m$  について、多くの実験結果をシールス数  $\Psi$  および沈降速度と摩擦速度の比  $w_0/u_*$  で整理したものである。前2者の結果はシールス数とともに増加するが、同じ  $\Psi$  では  $w_0/u_*$  の値が小さいほど大きな値となることがわかる。すなわち、 $\delta m$ 、 $\delta s$  は  $\Psi$  と  $w_0/u_*$  の両者によって支配される。自然砂と人工粒子の結果を比較すると、 $\delta s$  の結果については自然砂の方が小さい値となり、 $\delta m$  については逆に大きな値を取る傾向にある。粒径の大きな人工粒子ほど分散応力が卓越するので移動層厚が大きくなることは理解できるこ



図—13 移動層厚さの定義

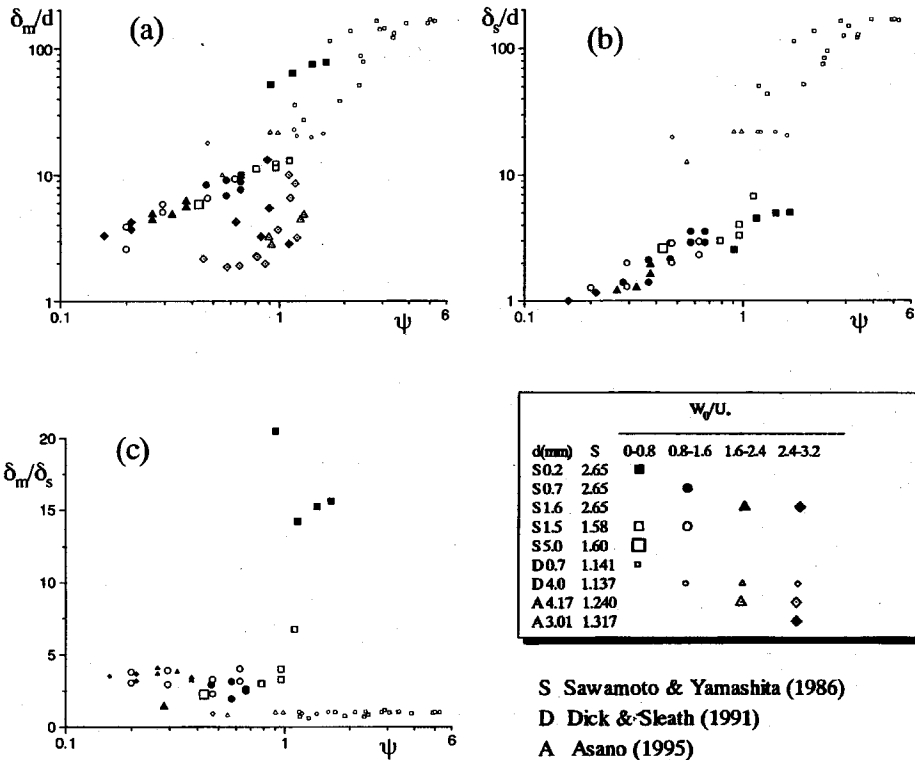
とである。しかし、自然砂の方が  $\delta m$  が大きくなったのは、自然砂を用いた移動状態では巻き上げによって水が濁り、正確な移動層厚が定めにくいことが推察でき、浮遊状態の高さまでシートフロー層厚と見なしたことが原因ではないかと思われる。

$\delta m / \delta s$  については一部のデータを除くとシールス数に依らず一定の特性をとるようであるが、それぞれのデータの精度が文献からは良くわからないためその特性は不明である。特に Dick and Sleath<sup>15)</sup> の結果ではこの値がすべて1に近く、それ以外の結果と比して小さい。彼らの実験は円筒形や半球形の粒子を用いており、かみ合わせや移動機構が異なることが予想され、結果の精度に疑問が残る。

#### 5. 結論

実験水槽内でシートフロー漂砂を再現させるために、比重が小さく粒径の大きな人工粒子がこれまで数多く用いられてきた。本研究は人工粒子を用いた場合の力学的等価性を、既往の実験結果の解析から調べたものである。まず、底質粒子の諸特性がどのようにシートフロー状漂砂の力学





図—14 移動層厚さとシールズ数 無次元沈降速度との関係

機構に関与するのかを考察した後、濃度分布・底質移動速度分布・漂砂量フラックス・シートフロー層厚に関して底質粒子による結果の相違を詳細に議論した。その結果、自然砂と人工粒子のデータグループとで以下のような定量的な相違が見られ、シールズ数が同一であっても人工粒子を用いた室内実験の結果が、自然砂に対する現地の現象を必ずしも正確に再現しないことが明らかになった。

(1) 粒径  $d$  で無次元化した濃度分布は、自然砂のデータが上方まで濃度変化が広がるのに対して、人工粒子はその変化が狭い範囲に限定される。自然砂の分布形状は  $z > 0$  で下に凸となり浮遊砂の濃度分布と近い形状となるが、人工粒子では概して上に凸の分布形となる。これは、自然砂では  $z > 0$  では上方の粒子を主として乱れ応力が支持するが、人工粒子では分散応力が卓越するためと考えられる。

(2) 底質粒子の移動速度にも濃度分布の場合と同じく粒子を支持する機構の違いが結果に反映されている。自然砂では  $z > 0$  の広い範囲で流速分布を持つのに対し、人工粒子では狭い範囲に限定される。

(3) 漂砂量フラックスの半周期平均値については、自然砂では漂砂量のピークは  $z = 0$  よりやや下方に存在するが、人工粒子ではやや上方に位置する。無次元半周期漂砂量は同じシールズ数では自然砂の方が大きな値になる。

(4) 移動層厚に関しては静止状態に対応する層厚は人工粒子の方が分散応力によって大きくなるが、移動状態では自然砂の方がやや大きな値を取る。

#### 参考文献

- 1) Sumar B. M., A Kozakiewicz, J. Fredsoe and R. Deigaard : Sheet flow measurements in steady currents, *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, 1996 (in Printing)
- 2) Bagnold, R. A. : Experiments on a gravity - free dispersion of large solid particles in a Newtonian fluid under shear, *Proc. Roy. Soc. London*, Ser. A-225, pp.49-63, 1954.
- 3) 土屋義人, 上田康裕, 大下哲則 : 掃流漂砂量則について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.306-310, 1984.
- 4) Horikawa K, A. Watanabe and S. Katori: Sediment transport under sheet-flow condition, *Proc. 18th Inter. Conf. of Coastal Engrg.*, pp.1335-1352, 1982.
- 5) 浅野敏之, 中村和夫, 中野康弘, 高沢俊満 : シートフロー状態の底質移動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.295-299, 1992.
- 6) Hanes, D. M. and D. L. Inman: Observations of rapidly flowing granular - fluid materials, *J. Fluid Mech.*, Vol. 150, pp.357- 380, 1985.
- 7) 後藤仁志, 辻本哲郎, 中川博次 : Saltation からシートフローへ

- の遷移過程における砂粒子群の運動特性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.326-330, 1993.
- 8) 山下俊彦, 染矢武彦, 野崎克博: 非定常性と比重の効果に着目したシートフロー状砂移動機構, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.331-335, 1993.
  - 9) 山下俊彦, 沢本正樹, 横山博美: 非定常流による平坦床漂砂量と砂の移動機構に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.281-285, 1984.
  - 10) 山下俊彦, 沢本正樹, 武田秀幸, 横森源治: 移動床上の振動流境界層とシートフロー状砂移動に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.297-301, 1985.
  - 11) 山下俊彦, 日比康生, 寺島貴志: シートフロー状漂砂の移動機構とnetの漂砂量, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.297-301, 1988.
  - 12) 山下俊彦, 金岡幹, 牧野有洋: 非定常性に着目したシートフロー状砂移動機構, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.291-294, 1992.
  - 13) Sawamoto, M. and T. Yamashita: Sediment transport rate due to wave action, *J. Hydrosoci. and Hydr. Engrg.*, Vol.4(1), pp.1-15, 1986.
  - 14) Ahilan, R.V. and J.F.A. Sleath: Sediment transport in oscillatory flow over flat beds, *J. Hydraulic Engrg.*, ASCE, Vol.113, No.3, pp. 308-321, 1987.
  - 15) Dick, J. E. and J. F. A. Sleath: Velocities and concentrations in oscillatory flow over beds of sediment, *J. Fluid Mech.*, Vol.233, pp.165-196, 1991.
  - 16) Ribberink, J. S. and A. Al-Salem: Bedforms, sediment concentrations and sediment transport in simulated wave conditions, *Proc. 22nd Inter. Conf. of Coastal Engrg.*, pp.2318-2331, 1990.
  - 17) Ribberink, J. S. and A. Al-Salem: Time-dependent sediment transport phenomena in oscillatory boundary layer flow under sheet flow conditions, *Delft Hydraulics*, Rep. H840, Part 6, 1992.
  - 18) Al-Salem, A. A.: Sediment transport in oscillatory boundary layers under sheet-flow conditions, Master Thesis, Technical University of Delft, 209p., 1993.
  - 19) Ribberink, J. S., I. Katopodi, K. A. H. Ramadan, R. Koelewijn and S. Longo: Sediment transport under (non)-linear waves and currents, *Proc. 24th Inter. Conf. of Coastal Engrg.*, pp. 2527-2541, 1994.
  - 20) Asano, T.: Sediment transport under sheet flow conditions, *J. Waterways, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, Vol.121, No.5, pp.1-8, 1995.
  - 21) Swart D. H.: Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles, *Delft Hydraulics*, Pub. No. 131, 1974.

(1996. 4. 9 受付)

## SYSTEMATIC DATA ANALYSIS ON OSCILLATORY SHEET FLOW IN LIGHT OF SEDIMENT PARTICLE PROPERTIES

Toshiyuki ASANO and Abbas Yeganeh BAKHTIARY

Oscillatory sheet flow is the sediment transport mode under stormy wave condition, so that a large wave flume almost comparable to the real sea condition is required for the reproduction. As an alternative, light and large artificial particles have been used in a relatively small flumes. However, the systematic differences can be found between data using natural sands and those using artificial particles. This study investigates the effects of particle properties on the sheet flow dynamics and discusses the validity of using the artificial particles. Systematic data analyses have been performed focusing on the concentration profile, velocity profile, transport flux and transport layer thickness.