

種々の漂砂移動形態を対象とした漂砂移動現象のモデル化

小野正順*・出口一郎**・榎木 亨***

1. はじめに

漂砂移動現象は、外力の大きさによって掃流漂砂が卓越する場合や浮遊漂砂が卓越する場合、シートフロー状の漂砂移動のように移動形態を変化させながら連続的に変化するため、流体運動と漂砂量を関係付けることはかなり困難である。漂砂移動現象のモデル化は、主に掃流漂砂や浮遊漂砂そしてシートフロー状漂砂の3つの漂砂移動形態について、それぞれ別々にモデル化がなされてきた。浮遊漂砂は、海底面に形成される砂漣上の渦によって底質砂が鉛直上方に巻き上げられることから、主に移流拡散方程式を基礎式として漂砂濃度が予測され、水平方向の漂砂の輸送速度は流体流速に追従するとして漂砂量が算定される。掃流漂砂やシートフロー状の漂砂移動は、流体の底部せん断力により底質砂が輸送される現象であることから、水平方向の漂砂の輸送速度については、水平方向の混相流体の運動方程式あるいは粒子混入の影響を粘性係数に考慮したN-S方程式を基礎方程式として求められ、漂砂濃度は漂砂の連続式により算定される。これらのことは、混相流体の運動方程式と連続式を用いることにより、全ての漂砂移動形態に対して漂砂移動現象を表現できることを示している。

従って本研究では、混相流体の運動方程式と連続式を用いて移動床上の漂砂移動現象をモデル化し、シートフロー状漂砂移動および浮遊漂砂が卓越している場合の漂砂移動現象についてモデルの適用性を検討した。

2. 種々の漂砂移動形態を対象とした漂砂移動現象のモデル化

2.1 基礎方程式

海底に xz 座標の原点をとり、鉛直上向きに z 座標をとる。海底は平坦移動床で、振動流場を仮定して解析を行った。底質砂は、一様粒径で非粘着性の底質である。砂粒子の運動と水粒子の運動は、水平方向に限って位相

差がなく砂粒子は流体運動に追従するものと考え、鉛直方向については固液混相の2流体モデルで考えた。従って基礎方程式としては、次に示す底質相と流体相の質量保存則と水平方向の運動量保存則である。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial cu}{\partial x} + \frac{\partial cw_s}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$-\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(1-c)u}{\partial x} + \frac{\partial(1-c)w_f}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} [(1-c)\rho_f w_f + c\rho_s w_s] u = -\frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\rho = (1-c)\rho_f + c\rho_s$ であり、 ρ, ρ_s, ρ_f ; 混相流体、底質相、流体相の密度、 u ; 混相流体の水平流速、 w_s, w_f ; 底質相、流体相の鉛直流速、 c ; 底質相の体積濃度、 p ; 圧力、 g ; 重力加速度である。上式において、未知数は、 u, w_s, w_f, c, p の5つである。

次に、それらの変数を定常成分+振動流成分(下添字無)と乱れ成分(')により表示し、振動流周期よりも短かく乱れ成分よりも長い時間スケールで時間平均($\bar{\quad}$)を行う。

流速どうしあるいは流速と濃度についての乱れの相関項を、ブシネスク型の近似を用いて平均量で表現すると、渦動粘性係数 Ω_x, Ω_z と拡散係数 k_x, k_z を用いて次式で表現される。

$$-\overline{c'u'} = k_x \frac{\partial c}{\partial x} \dots\dots (4) \quad -\overline{c'w_f'} \approx -\overline{c'w_s'} = -k_z \frac{\partial c}{\partial z} \dots\dots (5)$$

$$-\overline{u'u'} = \Omega_x \frac{\partial u}{\partial x} \dots\dots (6) \quad -\overline{u'w_s'} \approx -\overline{u'w_f'} = \Omega_z \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots (7)$$

混相流体の粘性係数を μ_e とすると基礎方程式は次のように表現される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial cu}{\partial x} + \frac{\partial cw_s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \dots\dots (8)$$

$$-\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(1-c)u}{\partial x} + \frac{\partial(1-c)w_f}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (9)$$

* 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho u - (\rho_s - \rho_f) k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \rho u^2 - 2 u k_x (\rho_s - \rho_f) \frac{\partial c}{\partial x} \right. \\ & - (\mu_e + \rho \Omega_z) \frac{\partial u}{\partial x} \left. \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\{ (1-c) \rho_f w_f + c \rho_s w_s \} u \right. \\ & - (\mu_e + \rho \Omega_z) \frac{\partial u}{\partial z} - (\rho_s - \rho_f) u k_z \frac{\partial c}{\partial z} \\ & \left. - (\rho_s w_s - \rho_f w_f) k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

混相流体の粘性係数は、砂粒子間応力の効果を含む Savage-McKeown の実験式 (1983) で与える。

$$\mu_e = 1.2 \lambda^2 \mu_0 \dots\dots\dots (11)$$

ここに μ_0 : 水の粘性係数, λ は線形濃度で底質砂の最密充填状態の体積濃度 $c_{max}(=0.65)$ を用いて次式で与えられる。

$$\lambda = 1 / \{ (c_{max}/c)^{1/3} - 1 \} \dots\dots\dots (12)$$

渦動粘性係数については、砂粒子混入の影響を考慮した灘岡らの式 (1989) を用いている。

$$\Omega_z = l_{(z)}^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \dots\dots (13) \quad \Omega_x = l_{(z)}^2 \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| \dots\dots (14)$$

ここで $l_{(z)}$ は、混合距離でカルマン定数 κ を用いて次式で示される。

$$l_{(z)} = \kappa \int_{-\infty}^z (c_{max} - c) / c_{max} dz \dots\dots\dots (15)$$

拡散係数は、渦動粘性係数に比例するとして比例定数定数をシュミット数 S_m で与えた。

底質相の沈降速度 w_s は、静水中での単一粒子の沈降速度 w_{s0} を用いて、次の実験式で与えた。

$$w_s = w_{s0} (1 - c/c_{max})^{2.3} \dots\dots\dots (16)$$

流体相の鉛直流速は、(8) 式と (9) 式の両辺をそれぞれ加えあわせた次式により算定している。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \{ c w_s + (1-c) w_f \} = 0 \dots\dots\dots (17)$$

圧力勾配は、境界層外縁における圧力勾配が内部まで一定と仮定した。

計算手順は、底質相に対する質量保存式の (8) 式により底質相の濃度を算定し、水平方向の運動方程式の (10) 式により混相流体の水平方向流速を求め、底質相、流体相の鉛直流速については、それぞれ (16) 式と (17) 式を用いて算定し、これらの4つの式を時間発展的に解いた。

数値計算は差分法を用い、時間差分については蛙飛び差分、移流項については3次の風上差分、他の空間差分については3次の中央差分を用いた。

2.2 境界条件及び初期条件

境界条件は、上方の条件として底質相の濃度と水平流速に対して次式の条件を与えた。

$$c w_s + k_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \dots (18) \quad u = U_0 \sin(\sigma t) \dots (19)$$

ここに、 U_0 ; 境界層外縁流速の振幅, σ ; 振動流の周波数である。上方の境界条件を与える高さは、境界層厚さ D_z の最大値を次式で定義し、その位置より上方で与えた。

$$\max(D_z) = 4 \kappa \max(u^*) / \sigma \dots\dots\dots (20)$$

ここに、 u^* は摩擦速度で次式で示される。

$$u^* = l_{(z)} \frac{\partial u}{\partial z} \dots\dots\dots (21)$$

下方の境界条件は、 $z=0$ から下を不動砂層と考え、漂砂濃度と混相流体の水平流速に対して下に示す境界条件を与えた。

$$c = c_{max}, \quad u = 0 \dots\dots\dots (22)$$

初期条件は、 $z=0$ の上に一定の厚さの高濃度層を与える。高濃度層の底での底質砂濃度は $0.99 c_{max}$ で表面での濃度は $0.97 c_{max}$ とし、層内は線形的に濃度を分布させた。そして、高濃度層の表面を初期砂面とした。

移動層厚の決定については、次式に示す Bagnold の仮定を用いる。

$$\mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \geq \int_z^{+\infty} (\rho_s - \rho_f) g c \tan \phi dz \dots\dots\dots (23)$$

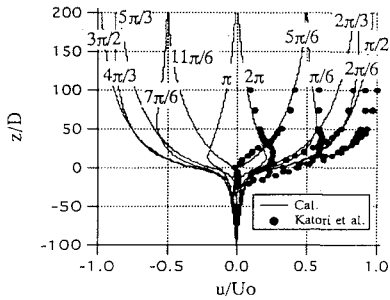
ここに、 ϕ ; 水中での底質砂の内部摩擦角, z ; 移動砂層下面の位置である。上式は、混相流体のせん断力とせん断抵抗の釣り合いによって移動砂層下面が決定される式である。浮遊粒子は gravity-free の運動であり、せん断抵抗にはほとんど関与していないと考えられる。また、水中における底質砂の内部摩擦角 ϕ についても底質粒子間の接触がなければかなり小さいと考えられる。運動している砂粒子同士が接触し始めるのは、線形濃度で $\lambda=1$ (体積濃度で 0.08) 程度である。従って、(23) 式の積分範囲は $\lambda > 1$ の範囲とし、 c のせん断抵抗への寄与率と ϕ は線形濃度に比例するとして表現した。そして、混相流体が Newton 流体として取り扱える線形濃度 $\lambda=14$ (体積濃度で 0.53) 以上の底質濃度の領域に対しては、すべての砂粒子の自重がせん断面に作用し、 ϕ も最密充填時の摩擦角に等しくなるように表現した。

本モデルは移流項を考慮して解析できるが、移流項を含めた計算を行うと収束性が悪化することから、今回の計算は移流項を省略している。

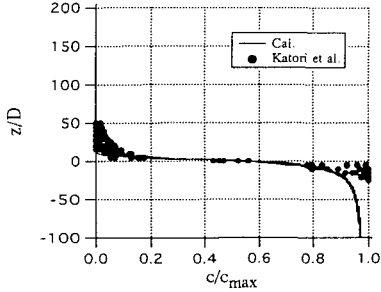
3. シートフロー状漂砂移動に対するモデルの適用性

はじめに、シートフロー状漂砂移動に対する本解析法の適用性を検証するため、香取らにより振動流装置を用いて行われた実験結果との比較を行った。実験条件は、底質粒径 $D=0.02$ cm, 境界層外縁流速振幅 $U_0=127$ cm/s 周期 $T=3.6$ s の場合である。

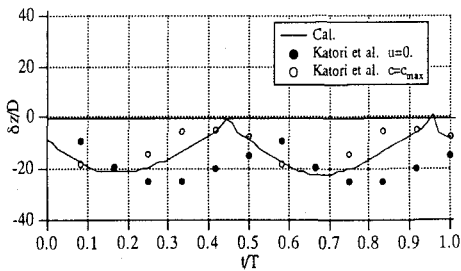
図-1 に実験結果と計算結果との比較を示す。(a) は混相流体の水平流速の鉛直分布、(b) は底質砂濃度の鉛直



(a)混相流体の水平流速の鉛直分布



(b)底質砂濃度の鉛直分布



(c)移動層厚 δz の位相変化

図-1 シートフロー状漂砂移動に関する解析法の適用性

分布, (c) は移動層厚の位相変化を示している。鉛直座標は初期砂面を $z=0$ にとっている。計算において初期砂層面は 2 cm を与えている。初期条件の影響はほぼ半周期でなくなるが、図に示した計算結果は、1 周期目から 2 周期目にかけての結果を示している。シュミット数の設定については、実験結果との比較を行いながら試行錯誤的に決定し、 0.10 に設定した。実験結果との比較を行うと、漂砂濃度の鉛直分布において $0.9c_{\text{max}}$ を越える高濃度層での濃度分布が、実験結果と大きく異なっていることがわかる。この原因としては、拡散係数が考えられるが拡散係数は混相流体の水平流速の鉛直勾配に比例するようおかれていることから、流速分布を規定する混相流体の粘性係数の定式化に問題があるものと考えられる。実験結果の移動層厚の決定については、底質砂の水平流速が 0 の位置と漂砂濃度が c_{max} に等しくなる位置についてそれぞれ求めた。実験結果と計算結果は、定性

的にも定量的にも良い一致を示すが、定性的に位相変化が多少ずれているのは、混相流体内の圧力勾配を境界層外縁における圧力勾配を用いて表現しているためであると考えられる。これらの結果より本モデルは、シートフロー状の漂砂移動については、ほぼ実験結果を再現できているものと考えられる。

4. 浮遊漂砂が卓越する場に対するモデルの適用性

4.1 Nakato et al. (1977) の実験結果との比較

浮遊漂砂の卓越する場合の漂砂移動現象に対して、本解析法の適用性を検証するために、Nakato et al. によって振動流水槽を用いてなされた実験結果との比較を行った。実験条件は、底質粒径 $D=0.014\text{ cm}$ 、Case 1 が境界層外縁流速振幅 $U_0=26.2\text{ cm/s}$ 、周期 $T=1.2\text{ s}$ 、砂漣波高 $\eta=0.9\text{ cm}$ 、Case 2 が $U_0=26.6\text{ cm/s}$ 、 $T=2.4\text{ s}$ 、 $\eta=1.8\text{ cm}$ の場合である。 $z=0$ の位置をどのように定義するかは非常に難しい問題であるが、論文では平均水深を $z=0$ に定義しているため、同様な定義で計算結果との比較を行った。計算結果については、 $S_m=1$ として計算を行い、漂砂濃度分布の位相変化はそれほど大きくないことから、図中には位相が 1.5π のときの計算結果を示す。Case 1, 2 について計算結果と実験結果との比較を示すのがそれぞれ図-2, 3 である。両方の実験ケースに対して、漂砂濃度の鉛直分布は、計算結果と実験結果ともにほぼ対数分布していることがわかる。しかしながら、各ケースの拡散係数の大きさ (図中のグラフの傾き) を比較すると、実験結果は計算結果よりもかなり大きいことがわかる。拡散係数については、シュミット数を設定し直すことで実験結果と同程度の拡散係数に設定できるが、そのシュミット数はシートフローの場合 ($S_m=0.10$) より $1.3\text{--}3.0$ とかなり大きな値で設定する必要がある。さらに、初期砂面 ($z=0$) 近傍の漂砂濃度についても実験結果は計算結果よりもかなり小さくなる。初期砂面の位置を砂漣の谷の位置にとったとしても、その位置での

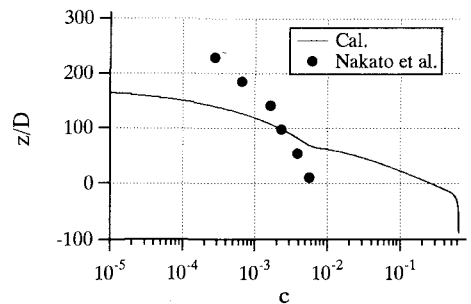


図-2 浮遊漂砂が卓越する漂砂移動に関する解析法の適用性 (Case 1)

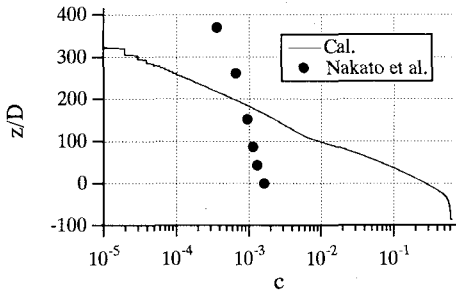


図-3 浮遊漂砂が卓越する漂砂移動に関する解析法の適用性 (Case 2)

漂砂濃度の実験結果は計算結果より1オーダー程度小さく、初期砂面近くの高濃度層で漂砂濃度の大きな減少あるいは不連続面が無ければ、実験結果を計算結果で説明することは困難である。この漂砂濃度の大きく減少(急変)する位置は、掃流漂砂と浮遊漂砂の境界面と考えられる。実験結果から推察すると、鉛直方向に漂砂濃度が急激に減少することから、この位置における拡散係数は小さくなるはずである。しかし、本モデルにおける拡散係数は混相流体の水平流速の鉛直勾配に比例するように与えており、この位置での拡散係数は大きくこのような拡散係数の定式化では実験結果を説明できないことがわかる。従って、掃流漂砂と浮遊漂砂の境界付近での砂移動現象の解明も併せて、拡散係数の再検討が必要である。

4.2 浮遊漂砂の拡散係数に関する検討

浮遊漂砂が卓越する場合の漂砂移動現象は、海底に砂漣が形成されており拡散係数が大きく、平坦移動床を仮定した解析法をそのような場に適用する場合、シュミット数を大きく設定する必要がある。しかしながら、砂漣上での流体運動は、平坦移動床上での流体運動と比較すると渦動粘性係数も大きくなっており、必ずしも拡散係数の増大はシュミット数の増大として片づけられる問題ではない。従って、実験により砂漣上での漂砂濃度と流体流速について同時測定を行い、(5)式と(7)式に基づいて漂砂濃度と流体流速の相関項、あるいは流体流速同志の相関項に関して検討を行い、渦動粘性係数と拡散係数についても検討を行った。

(a) 実験の概要；実験は、2次元移動床実験を行った。移動床の長さは3.5 m、厚さ15 cmで平坦に敷きならした。底質粒径Dは、0.012 cmの標準砂を用いた。水深は20 cmと一定とし、作用させた波条件はCase 1；T=1.87 s, H=6.9 cm, Case 2；T=1.73 s, H=5.6 cm, Case 3；T=1.59 s, H=6.7 cmの3種類である。それぞれ底質粒径を粗度としたシールズ数はs=0.22, 0.16, 0.21, 形成された砂漣形状はほぼ等しく波高0.9 cm波長が5-6 cmである。測定は、流体流速と漂砂濃度の測定

表-1 漂砂濃度と流体流速の相関項の値 (単位；cm/s)

Case 1 T=1.87 s, H=6.9 cm			
	$(c_0 + c_p)(u_0 + u_p)$	$\overline{c'w'}$	
z=2 cm	0.568×10^{-4}	0.243×10^{-6}	
z=1 cm	0.524×10^{-3}	0.131×10^{-4}	
$(c_0 + c_p)(w_0 + w_p)$	$c_p w_p$	$\overline{c'w'}$	$c_0 w_0$
0.193×10^{-3}	-0.288×10^{-4}	-0.734×10^{-5}	0.328×10^{-3}
0.874×10^{-3}	0.396×10^{-3}	0.701×10^{-5}	0.575×10^{-3}
Case 2 T=1.73 s, H=5.6 cm			
	$(c_0 + c_p)(u_0 + u_p)$	$\overline{c'w'}$	
z=2 cm	-0.191×10^{-3}	-0.505×10^{-5}	
z=1 cm	0.303×10^{-4}	0.253×10^{-5}	
$(c_0 + c_p)(w_0 + w_p)$	$c_p w_p$	$\overline{c'w'}$	$c_0 w_0$
-0.952×10^{-4}	-0.495×10^{-4}	0.420×10^{-6}	0.230×10^{-3}
0.330×10^{-3}	0.325×10^{-3}	-0.195×10^{-5}	0.575×10^{-3}
Case 3 T=1.59 s, H=6.7 cm			
	$(c_0 + c_p)(u_0 + u_p)$	$\overline{c'w'}$	
z=2 cm	-0.226×10^{-3}	0.497×10^{-5}	
z=1 cm	-0.575×10^{-4}	-0.338×10^{-4}	
$(c_0 + c_p)(w_0 + w_p)$	$c_p w_p$	$\overline{c'w'}$	$c_0 w_0$
0.679×10^{-4}	-0.259×10^{-5}	0.299×10^{-5}	0.206×10^{-3}
0.487×10^{-3}	-0.221×10^{-5}	-0.335×10^{-5}	0.479×10^{-3}

地点での水位変動と砂漣頂から1 cmと2 cm上方の2地点における鉛直・水平2方向の流体流速u, wと浮遊漂砂濃度cを同時測定した。漂砂濃度の測定には濁度計を、流体流速の測定には電磁流速計を用いて測定した。サンプリングタイムは、測定器の応答性を考慮して0.1 sとし、1地点につき、100 s程度連続して5回測定を行った。測定データを位相平均する際にサンプリングタイムの分だけ位相がずれないように、各データをラグランジュ補間により時間間隔0.01 sのデータに直し、波高の時系列を基に位相平均をとり、各物理量の時系列を定常成分(下添字0)、波動成分(下添字p)、乱れ成分(')に分離した。なお、時間平均濃度の鉛直勾配から算定した拡散係数は、上述した3ケースに対してそれぞれ $k_s=2.07, 1.26, 1.38 \text{ cm}^2/\text{s}$ であった。

(b) 漂砂濃度と流体流速あるいは流体流速同志の相関項に関する検討；表-1に各ケースの漂砂濃度と流速の相関項に関する測定結果を示す。

各ケースの鉛直流速と漂砂濃度の相関項に着目し、波動成分 $c_p w_p$ と乱れ成分 $\overline{c'w'}$ について比較してみると短周期波の場合にはほぼ同程度であるが、他のケースで乱れ成分は波動成分よりも1~2オーダー小さく、局所的なnetの漂砂量である $c_0 w_0$ を加えた $(c_0 + c_p)(u_0 + u_p)$ と比較すると全てのケースで乱れ成分は十分小さい。従っ

表-2 流体の水平流速と鉛直流速の相関項の値 (単位: cm^2/s^2)

Case 1 $T=1.87\text{ s}$, $H=6.9\text{ cm}$			
	$(u_0+u_p)(w_0+w_p)$	$\overline{u_p w_p}$	$\overline{u' w'}$
$z=2\text{ cm}$	16.03	16.75	2.86
$z=1\text{ cm}$	15.51	15.62	2.36
Case 2 $T=1.73\text{ s}$, $H=5.6\text{ cm}$			
	$(u_0+u_p)(w_0+w_p)$	$\overline{u_p w_p}$	$\overline{u' w'}$
$z=2\text{ cm}$	11.73	11.70	2.65
$z=1\text{ cm}$	5.14	4.82	0.12
Case 3 $T=1.59\text{ s}$, $H=6.7\text{ cm}$			
	$(u_0+u_p)(w_0+w_p)$	$\overline{u_p w_p}$	$\overline{u' w'}$
$z=2\text{ cm}$	11.95	11.32	2.41
$z=1\text{ cm}$	5.50	5.75	0.42

て、砂漣上での浮遊漂砂の巻き上げは、鉛直流速の定常成分+波動成分によってなされ、乱れ成分による拡散はほぼ無視できることがわかる。

さらに表中には、時間平均濃度と静水中における底質砂の沈降速度との積である沈降フラックス $c_0 w_{s0}$ も併せて示している。この沈降フラックスは、移流拡散方程式において定常で移流項を無視した場合（鉛直1次元拡散を仮定した場合）、表中に示す浮上フラックスである $(c_0+c_p)(w_0+w_p)$ と釣り合うが、表中に示されているように海底近く ($z=1\text{ cm}$) では浮上フラックスの方が大きく、上方 ($z=2\text{ cm}$) では沈降フラックスの方が大きい。これは測定地点が砂漣頂上であることから、海底近くでは底質砂が砂漣の斜面上から掃流漂砂で巻き上げられるため浮上フラックスの方が大きく、上方では水平方向から移流された浮遊砂雲からの底質砂の沈降により沈降フラックスが大きくなっているものと考えられる。参考のため表中に水平方向のフラックスも示してあるが、鉛直方向のフラックスよりも絶対値が大きいケースも見られ移流項による効果が無視し得ないことがわかる。

表-2は、各ケースについて流体の水平流速と鉛直流速の相関項の値を示す。流体流速同志の相関項の場合、定常成分がかなり小さく、波動成分の相関項が卓越していることが、漂砂濃度と流速の相関項の場合と異なる。また、乱れ成分の寄与率も全体の20%以下で、それほど大きくないことがわかる。これは砂漣上の渦が発生・発達するのは、砂漣の谷の位置であり、流速の測定位置が砂漣の峰上であることから、流速に含まれる渦流の影響が小さく、乱れ成分の寄与が小さいものと考えられる。渦流れが卓越する砂漣の谷上では、乱れ成分の卓越した流速の時系列が観測されるものと考えられるが、測定装置の設置の都合上測定できなかった。これらの実験結果

から渦動粘性係数及び拡散係数の算定を試みたが、各ケースの結果にばらつきが大きく、シュミット数に関する検討ができなかった。

これらのことから、砂漣上での漂砂移動現象に関する拡散係数及び渦動粘性係数を定式化する場合、砂漣上での渦流れを正確に測定する必要がある。特に渦動粘性係数は、砂漣の峰上と谷上で時空間的な分布がかなり異なると考えられる。本解析モデルのように平坦移動床を仮定している解析法は、砂漣1波長にわたる空間平均量として物理量（漂砂濃度と流速）が定義される。従って、実験によって検討を行う場合、これらの物理量を砂漣1波長にわたって空間的に同時測定する必要があると考えられる。

5. 結 論

1) 単相モデルによる漂砂移動現象のモデル化を行い、掃流漂砂・浮遊漂砂・シートフローの漂砂移動が卓越したり共存する場合の漂砂移動現象に適用できるモデルを構築した。2) 不動砂層（移動砂層厚）は、混相流体のせん断力とせん断抵抗のバランスにより計算され、本解析法をシートフローの場に適用した場合、混相流体の水平流速、漂砂濃度の鉛直分布、移動層厚の位相変化について、香取らの実験結果をほぼ再現できた。3) 浮遊漂砂が卓越する場合の鉛直方向の底質砂の拡散現象は、流体運動と漂砂濃度の乱れ成分の相関項による拡散への寄与率は小さく、波動成分の相関項あるいは砂漣上の渦による底質砂の鉛直方向の移流による寄与率が高い。4) 本解析法を浮遊漂砂の卓越する場合に適用する場合、シートフローの場合よりも大きなシュミット数を与える必要がある。その適用性は、浮遊漂砂濃度の鉛直分布については、実験結果、計算結果ともに対数分布を示す。しかしながら、掃流漂砂と浮遊漂砂の境界近傍において、実験結果では漂砂濃度の急変部があり、この物理機構を明らかにし解析モデルに取り込まなければ、定量的な予測はできないことがわかった。

最後に本研究を行うに当たり、倉田奨励金の援助を受けたことを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 香取完和・渡辺 晃・堀川清司 (1980): シート・フロー状態の底質移動に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 202-206.
- Nakato, T., F. A. Locher, J. R. Glover and J. F. Kennedy (1977): Wave entrainment of Sediment from rippled beds, A. S. C. E., WW1, Vol. 103, pp. 83-99.
- Savage, S. B. and S. McKeown (1983): Shear stresses developed during rapid shear of concentrated suspensions of large spherical particles, J. Fluid Mech., Vol. 127, pp. 453-472.