

大阪大学工学部 正員○小野正順

大阪大学工学部 正員 出口一郎

大阪大学工学部 正員 榎木 亨

1. はじめに；浮遊砂濃度の解析においては、移流拡散方程式が基礎式として用いられ、その時、基準点濃度及び拡散係数を与える必要がある。こうした基準点濃度や拡散係数は、流体の水理量と関連付けて議論されてきた。しかしながら、砂漣上あるいは移動床上などの海底の条件、底質粒子を含む混合流体の運動など、底質の浮遊現象自体が複雑な現象であることから、特に拡散係数の定式化は困難なものとなっている。波動場における浮遊漂砂の拡散係数は、漂砂濃度と漂砂輸送速度に関する波動成分及び乱れ成分の相関項を時間平均浮遊砂濃度の空間勾配を用いて表現する場合に定義される係数である。

従って本研究では、砂漣上における浮遊砂濃度と流体運動の同時計測を行い、両者の時間変動から漂砂濃度と漂砂輸送速度に関する波動成分及び乱れ成分それぞれの相関項を求め、各成分が拡散係数に及ぼす寄与について実験的に検討を行った。

2. 浮遊漂砂の拡散係数の定義；浮遊漂砂の連続式は、次式で表せられる。

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

ここに、 c ；漂砂濃度、 u_s, w_s ；漂砂の輸送速度をそれぞれ示す。ここで、定常状態を仮定すると(1)式における左辺第1項が無視される。さらに、漂砂濃度及び漂砂輸送速度について、定常成分（下添字0）、波動成分（下添字p）、乱れ成分（'）の3成分に分けて表示し、底質粒子の静水での沈降速度を w_f とし、1周期間で時間平均（式中バーで示す）を施すと次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left\{ c_0(w_{s0} - w_f) \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ c_p u_{sp} + c' u_s' \right\} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{c_p w_{sp}} + \overline{c' w_s'} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\overline{c_p u_{sp}} + \overline{c' u_s'} \right) \quad (2)$$

上式における $c_0, w_{s0}, c_0 u_{s0}$ は局所的なnetの漂砂量を示す。右辺第1項の微分演算子中の漂砂濃度と輸送速度の相関項は、浮遊漂砂の拡散係数 kz と時間平均された漂砂濃度の空間勾配を用いて表現される。砂粒子の波動成分と乱れ成分の運動が流体流速のそれぞれの成分に追随すると考え、砂粒子の輸送速度を流体流速で置き換えると拡散係数は次式で定義される。

$$kx = - \left(\overline{c_p u_p} + \overline{c' u'} \right) / \frac{\partial c_0}{\partial x} \quad (3)$$

$$kz = - \left(\overline{c_p w_p} + \overline{c' w'} \right) / \frac{\partial c_0}{\partial z} \quad (4)$$

さらに、鉛直1次元（水平方向の移流項を無視）とし、 $w_{s0}=0$ と考えると拡散係数は、時間平均濃度の空間勾配から次式によって求められる。

$$kz = -c_0 w_f / \frac{\partial c_0}{\partial z} \quad (5)$$

本研究では、(4)式に基づいて実験により漂砂濃度と鉛直流速を同時測定し、実験結果から各成分の相関項を求め、それぞれの成分の拡散係数への寄与について検討すると共に、鉛直1次元拡散方程式に基づく拡散係数の定義である(5)式の適用性についても検討を行った。

3. 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3.5m、厚さ15cmで平坦に敷きならした。底質砂は、中央粒径 $d_{50}=0.012\text{cm}$ の標準砂を用いた。水深は20cmと一定にし、作用させた波条件は、Case-1; $T=1.87\text{sec}, H=6.9\text{cm}$, Case-2; $T=1.73\text{cm}, H=5.6\text{cm}$, Case-3; $T=1.59\text{sec}, H=6.7\text{cm}$ の3種類である。

Masanobu ONO

Ichiro DEGUCHI

Toru SAWARAGI

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 0.9cm 波長が $5\text{--}6\text{cm}$ である。測定は、流速と漂砂濃度の測定地点での水位変動 η 、と砂漣頂から 1cm と 2cm 上方の2地点における、鉛直・水平2方向の流速 u, w と浮遊砂濃度 c を同時測定した。漂砂濃度の測定は濁度計を、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 0.1sec とし、1地点につき 100sec 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 0.01sec 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+波動成分）と（乱れ成分）に分離した。なお、(5)式に基づき時間平均濃度から算定した拡散係数は、上述した3種類のケースに対して、それぞれ $kz=2.07, 1.26, 1.38\text{cm}^2/\text{sec}$ であった。

4. 砂漣上の浮遊漂砂に対する漂砂濃度と流速の相関項について；表-1に各Caseの漂砂濃度と流速の相関項に関する測定結果を示す。なお、漂砂濃度は体積濃度を用いている。

表-1 各ケースの漂砂濃度と流速の相関項の値(単位； cm/sec)

Case1 $T=1.87\text{sec}, H=6.9\text{cm}$						
	$\overline{(c_0+c_p)(u_0+u_p)}$	$\overline{c'u'}$	$\overline{(c_0+c_p)(w_0+w_p)}$	$\overline{c_p w_p}$	$\overline{c'w'}$	$\overline{c_0 w_f}$
$z=2\text{cm}$	0.568×10^{-4}	0.243×10^{-6}	0.193×10^{-3}	-0.288×10^{-4}	-0.734×10^{-5}	0.328×10^{-3}
$z=1\text{cm}$	0.524×10^{-3}	0.131×10^{-4}	0.874×10^{-3}	0.396×10^{-3}	0.701×10^{-5}	0.575×10^{-3}
Case2 $T=1.73\text{sec}, H=5.6\text{cm}$						
	$\overline{(c_0+c_p)(u_0+u_p)}$	$\overline{c'u'}$	$\overline{(c_0+c_p)(w_0+w_p)}$	$\overline{c_p w_p}$	$\overline{c'w'}$	$\overline{c_0 w_f}$
$z=2\text{cm}$	-0.191×10^{-3}	-0.505×10^{-5}	-0.952×10^{-4}	-0.495×10^{-4}	0.420×10^{-6}	0.230×10^{-3}
$z=1\text{cm}$	0.303×10^{-4}	0.253×10^{-5}	0.330×10^{-3}	0.325×10^{-3}	-0.195×10^{-5}	0.575×10^{-3}
Case3 $T=1.59\text{sec}, H=6.7\text{cm}$						
	$\overline{(c_0+c_p)(u_0+u_p)}$	$\overline{c'u'}$	$\overline{(c_0+c_p)(w_0+w_p)}$	$\overline{c_p w_p}$	$\overline{c'w'}$	$\overline{c_0 w_f}$
$z=2\text{cm}$	-0.226×10^{-3}	0.497×10^{-5}	0.679×10^{-4}	-0.259×10^{-5}	0.299×10^{-5}	0.206×10^{-3}
$z=1\text{cm}$	-0.575×10^{-4}	-0.338×10^{-4}	0.487×10^{-3}	-0.221×10^{-5}	-0.335×10^{-5}	0.479×10^{-3}

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 $\overline{c_p w_p}$ 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 $\overline{c_0 w_f}$ を加えた $\overline{(c_0+c_p)(w_0+w_p)}$ 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 $\overline{c_0 w_f}$ も併せて示している。この沈降フラックスは、定常で移流項を無視した場合、表中に示す浮上フラックスである $\overline{(c_0+c_p)(w_0+w_p)}$ と釣り合うが、表中に示されているように海底近くでは浮上フラックスの方が大きく、上方では沈降フラックスの方が大きい。これは測定値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、その上方では、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。参考のために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。

また、鉛直1次元拡散を仮定した場合に拡散係数は、(5)式に示されるように $\overline{c_0 w_f}$ により決定される。そこで、 $\overline{c_0 w_f}$ と $\overline{c_p w_p}$ について比較してみると海底面付近についてはほぼ同程度の値を示すが、海底面から離れた点では、 $\overline{c_p w_p}$ に比べて $\overline{c_0 w_f}$ の方がかなり大きな値を示している。これは、鉛直1次元拡散を仮定したことで鉛直方向の砂収支しか考慮されていないためであると考えられ、砂漣上で浮遊漂砂の解析には鉛直1次元拡散が仮定できないことがわかる。これらのことから拡散係数を定式化する場合、砂漣上での流速場の位相変化を精度よく算定することが重要であることがわかった。