

II-283 波浪下における浮遊砂の濃度分布

愛媛大学工学部 正員 伊福 誠  
愛媛大学工学部 正員 柳 昭忠男

1. まえがき

著者らは砂浜海岸の碎波帯で波・流れと浮遊砂濃度の観測を実施して、若干の基礎的資料を得ている。

本研究は乱流境界層理論に基づき境界層内の流速を算出し、この流速を用いて Kalkanis (1965) の手法にしたがい底面の濃度を与えて乱流拡散方程式を解くことにより波動場における浮遊砂濃度を解析して、現地観測で得た浮遊砂濃度の平均値と流速と浮遊砂濃度との位相差を説明しようとするものである。

2. 基礎方程式と初期条件, 境界条件

基礎方程式

境界層内の流速: 流体が非圧縮性でその運動が非定常な場合の鉛直1次元境界層方程式は次式のようにあらわされる。

$$\frac{\partial u_d}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (N_z \frac{\partial u_d}{\partial z}) \quad (1)$$

ここに、 $t$  は時間、 $u_d$  は欠損流速、 $N_z$  は渦動粘性係数である。

濃度: 沈降速度  $w$  を持つ物質の鉛直1次元拡散方程式は次式のようにあらわされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C}{\partial z}) + w_0 \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

ここに、 $C$  は物質の濃度、 $w$  は鉛直方向の水粒子速度、 $K_z$  は乱流拡散係数である。

初期条件および境界条件

式(1)の初期条件および境界条件は、それぞれ

$$u_d(z, 0) = -U_{bm} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_d(z_0, t) &= -U_b(\delta_B, t) \\ u_d(\delta_B, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

とする。ここに、 $U_{bm}$  は境界層外縁の最大流速、 $z_0$  は粗度長、 $U_b$  は境界層外縁の流速、 $\delta_B$  は掃流層厚である。

式(2)の初期条件および境界条件は、それぞれ

$$C(z, 0) = 0 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} C(0, t) &= C_0(t) \\ K_z \frac{dC}{dz} + w_0 C &= 0 \quad z=h \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

とする。ここに、 $C_0(t)$  は底面における濃度、 $h$  は水深である。

3. 数値解析

式(1)および(2)は差分法(クラーク-ニコルスン法)を用いて解析する。鉛直座標は100分割し、底面から粒径の3倍の高さまでを粒径の1/2の等間隔、それより海面までを等比級数により分割する。また、時間は波の1周期を32分割する。

渦動粘性係数は浅野ほか(1984)にならうい、次式で与える。

$$N_z = \alpha K u_* z \quad (7)$$

ここに、 $\alpha$  は1より小さい比例定数、 $K$  はカルマン定数、 $u_*$  は摩擦速度( $\sqrt{f} U_{bm}$ 、 $f$ : 海底摩擦係数)である。海底摩擦係数は著者らの経験式を用いて求める。

粗度長は Bakker - van Doorn (1978) にならうい、次式で与える。

$$z_0 = \eta / 33 \quad (8)$$

ここに、 $\eta$  は砂粒の高さであり、次式で示さぬ Nielsen (1981) の経験式を用いて算出する。

$$\eta / a_m = 2.1 \theta^{-1.85} \quad (9)$$

ここに、 $a_m$  は海底における水粒子軌道の長軸の半分長、 $\theta = \rho_f U_b^3 / (\rho_s - \rho_f) g d_{50}$  ( $\rho_f, \rho_s$  は流体、物質の密度、 $g$  は重力の加速度、 $d_{50}$  は物質の中央粒径) である。

境界層厚は野田(1969)にならうい、次式で与える。

$$\delta_B = 25 \delta' \quad (10)$$

ここに、 $\delta' = \sqrt{\nu T / 2\pi}$  ( $\nu$ : 流体の動粘性係数、 $T$ : 波の周期) である。

底面の濃度は Kalkanis (1965) の理論を用い、次式のようにあらわされる。

$$C_0 = \frac{2}{3} P \rho_s' dV / \delta_b \bar{u}_s \quad (11)$$

ここに、 $\rho_s$ は物質の乾燥密度、 $d$ は粒径、 $V$ は物質の位相速度、 $\delta_b$ は掃流層厚、 $U_s$ は掃流層内の断面平均流速、 $P$ は物質の動き始める確率を次式のようにあらわす。

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{B_s V - 1/u_0}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (12)$$

ここに、 $B_s = 4/3 C_L \eta_0$  ( $C_L$ :揚力係数、 $\eta_0$ :経験的に求まる定数)、 $\psi = (\rho_s - \rho_f) g d / \rho_f u_0^2$  ( $u_0$ :物質に作用する流速)である。

式(12)中の物質の位相速度は掃流層内の断面平均流速に等しいと仮定する。

乱流拡散係数は次式のように鉛直方向に線型に変化すると仮定する。

$$K_z = \beta N z \quad (13)$$

ここに、 $\beta$ は比例定数である。

#### 4. 観測結果

表1に現地観測で得た有義波高、有義波周期、平均水深、海底から4cmの高さで得た平均砂濃度、砕波の発生頻度を示す。

#### 5. 解析結果

現地観測で得た波はストークス波の3次近似解が適用される領域にある。観測で得た有義波高、有義波周期、平均水深を用いてパラメトリック解析を行った。図1は底面の濃度と $z=d$ の高さの流速の時間変化を示したものであり、実線が濃度、点線が流速、破線は物質が動き始める確率がほぼ $3 \times 10^{-10}$ となる $u_0$ の値、 $\pm 0.05$  m/sである。南向き、北向き流速が最大となる位相より $7\pi/16$ 早い位相から濃度が高くなる。この点は野田(1966)が層流境界層理論に基づく底質の初期移動の解析で得た $3\pi/8$ より若干大きい。

図2は1周期平均の濃度分布と観測結果とを比較したものであり、図中の黒丸が観測結果である。観測結果と良く合っている実線は $\alpha = 0.1$ 、 $C_L = 0.2$ 、 $\beta = 2.8$ 、掃流層厚を粒径の2倍としたものであり

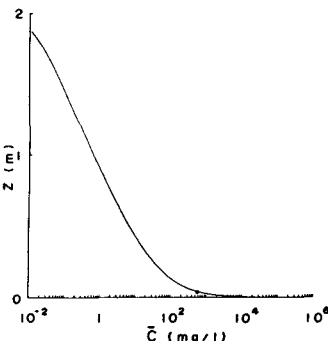


図2 1周期の平均濃度(Run No. BA83108-4);  
(—):  $\alpha = 0.1$ ,  $\beta = 2.8$ ,  $C_L = 0.2$   
(●): 観測値

る。濃度分布は「く」の字形を示し、底面近傍で急激に変化がみられる。

図3は現地における南向き流速(海底から7cmの高さ)の最大値に対する濃度の最高値の位相差の頻度分布を計算して得た濃度波形と比較したものである。現地における位相差の頻度分布は $\pi/2$ と $11\pi/10$ のところで高い値を示し、計算した濃度波形はそうしたところをピークが生じており、観測結果をうまく説明するようである。

表1 観測結果

資料	平均水深 (m)	有義波		平均浮遊砂濃度 (mg/l)	砕波の発生頻度 (%)
		波高 (m)	周期 (s)		
BA83108-1	1.93	0.47	4.4	524	15
BA83108-2	1.95	0.41	4.5	586	17
BA83108-4	2.01	0.46	4.6	596	13
BA83108-5	2.05	0.46	4.7	596	18
BA83108-6	2.08	0.45	4.6	711	16
BA83108-7	2.11	0.47	4.7	808	16
BA83108-8	2.15	0.53	4.5	789	14

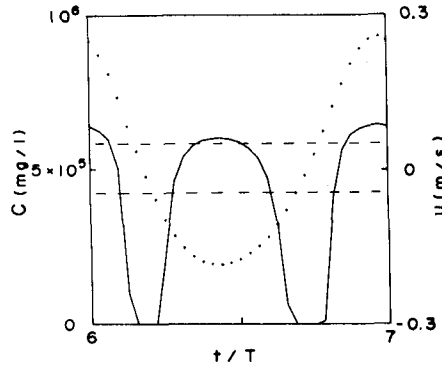


図1 底面の濃度と $z=d$ の流速 (Run No. BA83108-4);  
(—): 濃度, (····):  $z=d$ の流速, (---):  $P = 3 \times 10^{-10}$ となる $u_0$ の値  $\pm 0.05$  m/s

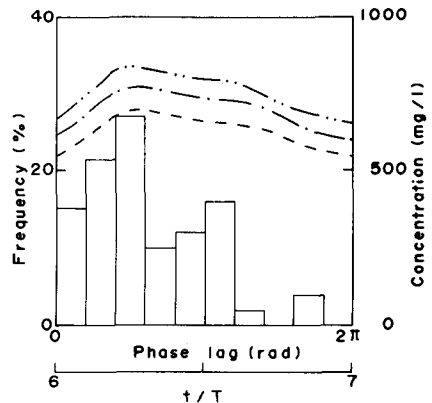


図3 現地における南向き流速-濃度位相差の頻度分布と計算して得た濃度波形 (Run No. BA83108-8);  
(---):  $\alpha$   $\beta$   $C_L$   
(---): 0.1 2.8 0.2  
(---): 0.2 1.4 0.2  
(---): 0.4 0.7 0.2