

碎波帯における浮遊砂の濃度分布 (I)

一 梅津寺海岸における観測資料と種々の渦動粘性係数、乱流拡散係数に基づく数値解析一

愛媛大学工学部 正 員 ○伊福 誠

愛媛大学工学部 正 員 柿沼忠男

1. まえがき

従来、波動乱流境界層方程式を解く際には摩擦応力を時間的には一定の渦動粘性係数や Prandtl の混合距離論に基づいて評価している。また、乱流拡散方程式を解く際には乱流拡散係数は時間的に一定で鉛直方向には一定あるいは線形に変化すると仮定している。

本研究ではそうした両係数を鉛直方向では線形に変化させ、時間的には一定の場合と変化さず場合を取り扱っており、まず境界層内の流速を算出し、次にこの流速を用いて Kalkanis (1965) の手法に従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碎波帯で得た観測結果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および境界条件

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一次元の境界層方程式は一般に次式のようにあらわされる。

$$\frac{\partial(u - u_b)}{\partial t} = \frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 t は時間、 u は流速、 u_b は境界層外縁の流速、 ρ_f は流体の密度、 τ は摩擦応力である。

濃度 : 沈降速度 w_o を持つ物質の鉛直一次元拡散方程式は次式のようにあらわされる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_o \frac{\partial c}{\partial z} \quad (2)$$

ここに、 c は濃度、 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)および式(2)の初期条件および境界条件はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} u(z, 0) &= 0 \\ u(z_o, t) &= 0 \\ u(\delta_B, t) &= u_b(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} c(z, 0) &= 0 \\ c(\delta_B, t) &= c_o(t) \\ K_z \frac{dc}{dz} + w_o c &= 0, z=h \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 z_o は粗度長、 u_b は境界層外縁の流速、 δ_B は境界層厚、 $c_o(t)$ は掃流層内の濃度、 h は水深である。

3. 数値解析

式(1)および式(2)は差分法(クランク-ニコルソン法)を用いて解析する。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的に分割する。なお、分割点数は101である。また、時間間隔は $T/96$ (T : 波の周期)とする。

摩擦応力は境界層外縁の最大流速あるいは境界層外縁流速の振幅に依存する渦動粘性係数を用いると

$$\tau = \rho_f \alpha \kappa \sqrt{f} u_{bm} z \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5-1)$$

$$\tau = \rho_f \alpha \kappa \sqrt{f} |u_b(t)| z \frac{\partial u}{\partial z} \quad (5-2)$$

とあらわされる。ここに、 α は比例定数、 κ はカルマン定数、 f は海底摩擦係数であり著者らの経験式(1985)を用いて求める。

また、Prandtl の混合距離論に基づく摩擦応力は、

$$\tau = \rho_f (\kappa z)^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| \frac{\partial u}{\partial z} \quad (6)$$

とあらわされる。

境界層厚は野田(1969)にならい、次式で与える。

$$\delta_B = 2.5 \delta'$$

ここに、 $\delta' = \sqrt{\nu T / 2\pi}$ (ν : 流体の動粘性係数)である。粗度長は Bakker-van Doorn (1978) にならい、 $z_o = \eta / 33$ (η : 砂れんの高さ)とし、砂れんの高さは Nielsen (1981) の経験式 $\eta / a_m = 21 \theta^{-1.35}$ (a_m : 海底における水粒子軌道の長軸の半分長、 $\theta = \rho_r \cdot u_{bm}^2 / (\rho_s - \rho_f) g d_{50}$ 、 ρ_s は底質の密度、 g は重力の加速度、 d_{50} は底質の中央粒径)を用いて算出する。底面の濃度は Kalkanis (1965) の理論を用いると、

$$c_o = 2 P f_s' d V / 3 \delta_B \bar{u}_s \quad (7)$$

ここに、 ρ_s は物質の乾燥密度、 d は粒径、 V は物質の伝播速度、 u は層流境界層内の断面平均流速、 P は物質の動き始める確率で次式のように表せる。

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{B/V - 1/\eta_0}^{\infty} \exp(-z^2/2) dz \quad (8)$$

ここに、 $B = 4/3 C_L \eta_0$ (C_L : 揚力係数、 η_0 : 経験定数)、 $\psi = (\rho_s - \rho_f)gd / \rho_f u_0^2$ (u_0 : 物質に作用する流速) である。

乱流拡散係数は次の三通りを仮定する。

$$K_z = \beta \alpha K \sqrt{f} u_{bm} z \quad (9-1)$$

$$K_z = \beta \alpha K \sqrt{f} |u_b(t)| z \quad (9-2)$$

$$K_z = \gamma \{ l_L w^2(z,t)/q + l_T u^2(z,t)/q \} \quad (9-3)$$

ここに、 β : 比例定数、 $q = \{u^2(z,t) + w^2(z,t)\}^{1/2}$ 、 l_L 、 l_T : 特性長であり、 $l_L = \alpha l_T$ (α : 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の高さで得た平均浮遊砂濃度、(B83108-1~8)および30cmの高さ(B84317-5)の碎波の発生頻度を示す。

5. 解析結果

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ータ解析を行った。なお、観測で得た有義波はストークス波の第3次近似解が適用される領域にある。

図1は砂粒子頂部の流速の時間波形を示したものであり、破線、点線および一点鎖線は、それぞれ摩擦応力を式(5-1)、(5-2)および(6)で評価したものである。三者とも前後非対称であり、その度合いは摩擦応力を式(5-2)で評価したものが最も大きい。岸向き流速が最大となる位相はほぼ同じであるが、沖向き流速が最大となる位相は点線のもの破線および一点鎖線のものより $5\pi/24$ 程度早い。この流速の非対称

性は底面の濃度あるいは漂砂の移動方向に影響すると考えられる。

図2は平均浮遊砂濃度の鉛直分布を示したものであり、実線、破線、点線はそれぞれ拡散係数を式(9-3)、(9-1)、(9-2)で仮定した場合のものであり、図中の黒丸、白丸は実測値である。

底面から4cmの高さでは三者ともほぼ同じ濃度であるが底面からの距離が大きくなるにつれて濃度差が大きくなる。乱流拡散係数を式(9-3)で仮定したものは観測値を最も良く説明する。

図3は現地における岸向き流速(海底から7cmの高さ)の最大値に対する浮遊砂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。図中の実線、点線、破線は図2に対応する。三者とも観測値がピークを示す位相でピークを示しているが、乱流拡散係数を鉛直方向と同時に時間的に変化させた場合が頻度分布とも良く対応して観測結果をうまく説明するようである。

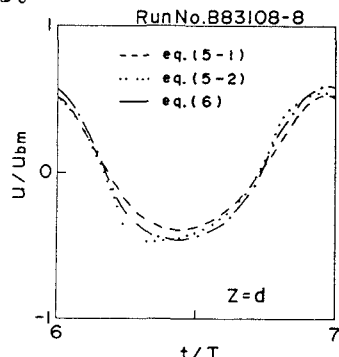


図1 砂粒子頂部の流速

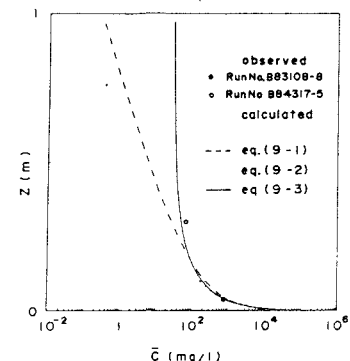


図2 平均濃度の鉛直分布

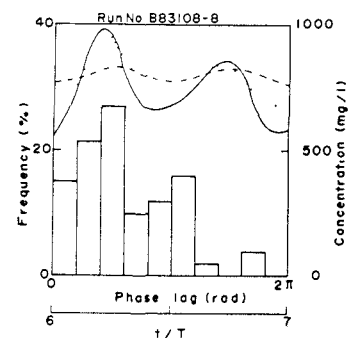


図3 現地における岸向き流速-濃度位相差の頻度分布と解析で得た濃度波形

表1 観測結果

Data No	Mean water depth (m)	Significant wave		Mean concentration of suspended sediment (mg/l)	Frequency of occurrence of breaker (%)
		Height(m)	Period(s)		
B83108-1	1.93	0.47	4.4	524	15
B83108-2	1.95	0.41	4.5	586	17
B83108-4	2.01	0.46	4.6	596	13
B83108-5	2.05	0.46	4.7	596	18
B83108-6	2.08	0.45	4.5	711	16
B83108-7	2.11	0.47	4.6	808	16
B83108-8	2.15	0.53	4.5	789	19
B84317-5	2.20	0.54	4.9	80	19