

波動乱流境界層の数値解析

京都大学工学部 正員 岩垣 雄一
京都大学工学部 正員 浅野 敏之
建設省 正員 〇五道 実

1. 緒言 波動流, 振動流の下での底面乱流境界層内の水理特性を明らかにすることは, 沿岸域での漂砂機構, 海浜流の発生, 質量輸送等の現象を解明する上で非常に重要である。本研究は高次の完結モデルである乱流輸送モデルを用いて, 底面乱流境界層内の水理特性を明らかにしようとするものである。本研究においては乱流輸送モデルの中でも Jones-Launder (1972) によって導かれた低レイノルズ数の流れに適用できる k-ε モデルを用いて数値計算を行った。

2. 基礎方程式 本研究で用いた無次元化された基礎方程式は次のとおりである。

$$\frac{\partial \tilde{u}_r}{\partial t_r} = S \frac{\partial \tau_r}{\partial z_r} + \frac{S}{Re} \frac{\partial^2 \tilde{u}_r}{\partial z_r^2} \quad \dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_r}{\partial t_r} = & \frac{\partial}{\partial z_r} \left\{ \left(\frac{S}{Re} + \frac{1}{2} S^2 \frac{C_{\mu} f_{\mu}}{\sigma_k} \frac{k_r^2}{\epsilon_r} \right) \frac{\partial k_r}{\partial z_r} \right\} \\ & + 2 S \tau_r \frac{\partial \tilde{u}_r}{\partial z_r} - \epsilon_r - 2 \frac{S}{Re} \left(\frac{\partial k_r}{\partial z_r} \right)^2 \end{aligned} \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon_r}{\partial t_r} = & \frac{\partial}{\partial z_r} \left\{ \left(\frac{S}{Re} + \frac{1}{2} S^2 \frac{C_{\mu} f_{\mu}}{\sigma_{\epsilon}} \frac{k_r^2}{\epsilon_r} \right) \frac{\partial \epsilon_r}{\partial z_r} \right\} \\ & + 2 S C_{1f} \frac{\epsilon_r}{k_r} \tau_r \frac{\partial \tilde{u}_r}{\partial z_r} - C_{2f} \frac{\epsilon_r^2}{k_r} + 2 \frac{S^3}{Re} \frac{C_{\mu} f_{\mu}}{\epsilon_r} \frac{k_r^2}{\epsilon_r} \left(\frac{\partial \tilde{u}_r}{\partial z_r} \right)^2 \end{aligned} \quad \dots (3)$$

$$\tau_r = \frac{1}{2} S C_{\mu} f_{\mu} \frac{k_r^2}{\epsilon_r} \frac{\partial \tilde{u}_r}{\partial z_r} \quad \dots (4)$$

ここに, $Re = U_0 D / \nu$, $S = U_0 / \omega D$ であり, また, 添字 r を有する物理量は次式で定義される無次元量である。

$$\tilde{u}_r = (u - U) / U_0, \quad z_r = z / D, \quad \tau_r = -\overline{u'w'} / U_0^2$$

$$k_r = k / \frac{1}{2} U_0^2, \quad \epsilon_r = \epsilon / \frac{1}{2} \omega U_0^2, \quad t_r = t \omega$$

上式で, k は乱れエネルギー, ϵ は乱れエネルギーの消散率, u は境界層内流速, U, U_0 は境界層外縁流速およびその振幅,

$-\rho \overline{u'w'}$ はレイノルズ応力, ω は角周波数, D は境界層厚, z は底面からの距離である。また, 式中の定数は Jones 3 によ

って提案されている次の値を用いる。

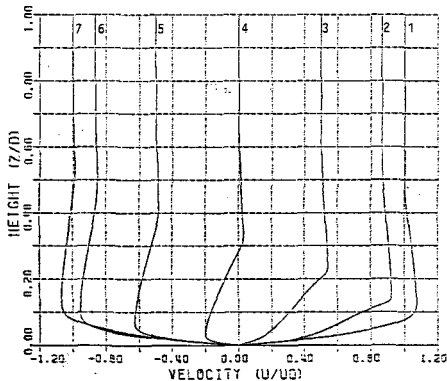


図-1 平均流速の鉛直分布

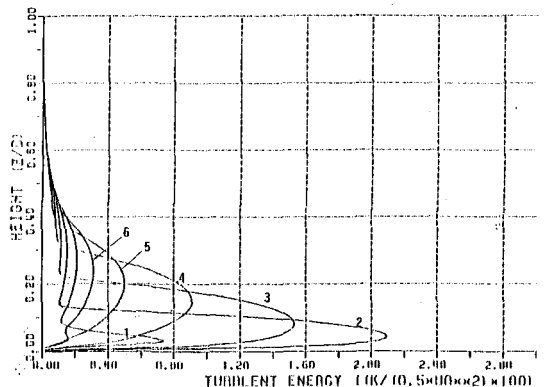


図-2 乱れエネルギーの鉛直分布

Yuichi IWAGAKI, Toshiyuki ASANO, Hitomi GODO

$C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.55$, $C_2 = 2.0$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$

また、式中の f_1 は 1.0, f_2, f_μ は乱れレイノルズ数 $R_T (= \rho^2/\epsilon)$ の関数で、次式で表わされる。
 $f_2 = 1.0 - 0.3 \exp(-R_T^2)$, $f_\mu = \exp\{-2.5/(1 + R_T/50)\}$

3. 境界条件および計算方法 境界条件として次式を用いた。 $z_r = 0$ で $\hat{u}_r = -\cos \tau_r$,

$k_r = 0$, $\epsilon_r = 0$ --- (5), $z_r = 1$ で $\partial \hat{u}_r / \partial z_r = 0$, $\partial k_r / \partial z_r = 0$,

$\partial \epsilon_r / \partial z_r = 0$ --- (6) 式(1),(2),(3)を陰形式に差分化して数値計算を行った。空間メッシュは境界層内を600等分, 時間メッシュは1周期を2160等分してある。

4. 計算結果 計算条件は $U_0 = 30.0 \text{ cm/sec}$, $T = 9.8 \text{ sec}$, $D = 4.0 \text{ cm}$ である。図-1, 2, 3, 4 はそれぞれ平均流速, 乱れエネルギー, レイノルズ応力, 乱れエネルギーの消散率の鉛直分布を $\pi/6$ ごとの位相で表わしたものである。図中の番号 n は波の位相 θ を表わすもので両者の関係は $\theta = \pi/6 \times (n-1)$ である。図-5 は片対数紙上に平均流速をプロットしたものである。図中の破線は堤浦の理論による

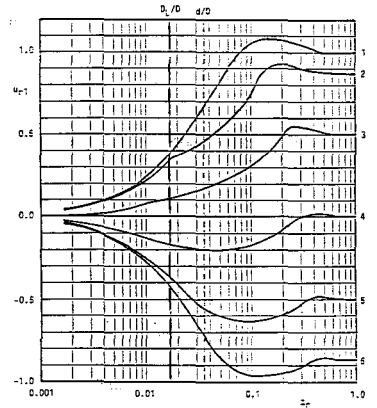


図-5 平均流速分布

粘性底層厚 D_L を D で無次元化したもので, 1 周期にわたって一定であるが, 本計算結果からその高さは位相によって変化することかわかる。本モデルでは滑動粘性係数は乱れレイノルズ数のみの関数となり, $R_T = 5$ のときレイノルズ応力は分子粘性によるせん断応力の約4.5%となる。図-6 は $R_T = 1$ と 5 の等値線であり, 破線は D_L/D である。図より等値線は位相により変化しており, また破線の値と $R_T = 5$ の等値線の平均値とは, ほぼ等しいことがわかる。

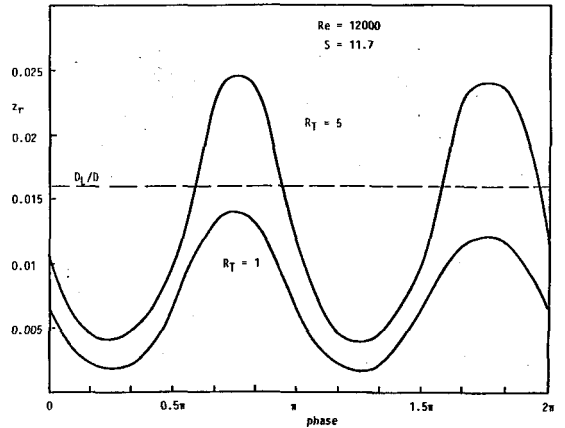


図-6 $R_T = 1$ と 5 の等値線の位相による変化

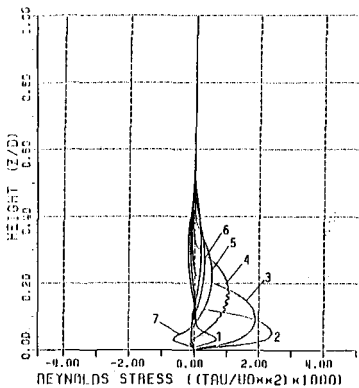


図-3 レイノルズ応力の鉛直分布

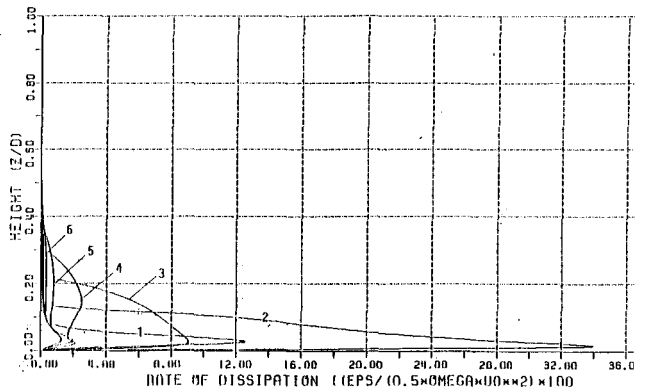


図-4 乱れエネルギーの消散率の鉛直分布