

波状底面を持つ開水路流の数値シミュレーション

九州大学 学生員○黒田幸稔

九州大学 正 員 松永信博

九州大学 学生員 杉原裕司

九州大学 正 員 小松利光

1. はじめに

波状底面上の流れと乱れの構造を明らかにすることは、河床波上における底質の浮遊構造の解明や浮流砂量を推定する上で重要であり、これまで多くの研究者によって理論的あるいは実験的に研究されてきた。

本研究の目的は、波状底面上の開水路乱流に $k-\varepsilon$ 乱流モデルを適用し、数値計算を行うことによりその特性を明らかにすることである。本計算においては、自由表面の取扱いが重要であることから自由表面を有する流れ場の解析手法として開発されたMAC法が適用された。

2. 数値計算

二次元の開水路乱流場の基礎方程式は、連続の式、運動方程式、乱れエネルギーの輸送方程式、エネルギー散逸率の輸送方程式で以下の様になる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial (u v)}{\partial y} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u' u'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u' v'}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (u v)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u' v'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v' v'}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (k u)}{\partial x} + \frac{\partial (k v)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (v + \nu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (v + \nu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial y} \right\} \\ &+ \nu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} - \varepsilon \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\varepsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial (\varepsilon v)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (v + \nu_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (v + \nu_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right\} \\ &+ C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_t \left\{ 2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned}$$

ここで、 u , v はそれぞれ水平、鉛直方向の平均流速成分、 P は圧力、 ρ は密度、 ν は動粘性係数である。

境界条件としては、流速については、底面で0、水表面でせん断力0、乱れエネルギー k 、エネルギー散逸率 ε については、底面で以下の関係が成立するものとし、水表面では鉛直方向の勾配0の条件を用いた。

$$\frac{k}{u_*^2} = \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{k z_0}$$

3. 計算結果および考察

波状底面をもつ開水路流は、フルード数と kh の値によって、out-phase flow, chutes & pools flow, in-phase flow の3つに分類される¹⁾。ここで、 k は波状底面の波数であり、 h は平均水深である。図-1

はその形成領域を示したものである。図中の実線は out-phase flow の形成領域と in-phase flow の形成領域との境界であり、ポテンシャル理論より求められた関係

$$Fr^2 = \tanh(kh) / kh$$

である。一方、点線は経験的に求められた out-phase flow と chutes-pools flow との境界である。図中の黒印 1, 2, 3 は数値解析において対象とした水理条件を示している。

図 2 (a), (b), (c) は、それぞれ図 1 の 1, 2, 3 で与えられた水理条件のもとで解析された水面形と流速分布を示している。図 2 (a) において、水面形は底面形状と逆位相の関係をもち、底面の谷において流速は減速するため境界層は厚くなり、峰において流れの加速効果のために流速分布が一様化する様子がわかる。図 2 (b) は、底面の一波長間において常流と射流の形態が混在しており、chutes-pools flow が形成されていることがわかる。峰の背後では流れが減速されるため境界層が厚くなり、流れはまさに剥離する寸前であることがわかる。また、峰の上においては流れの強い加速のため一様化された流速分布が認められる。図 2 (c) は、水面形と波状底面との間には約 $\pi/3$ の位相差が現れているが、ほぼ同位相とみなせることがわかる。

紙面の都合上、レイノルズ応力や k 、 ε の空間分布に関しては割愛したが口頭発表時に示す予定である。

参考文献

1) 松永信博・並川 正・櫻村康史・岩崎 日出夫: 固定波面上のせん断乱流構造, 第30回水理講演会論文集, pp.589-pp.594, 1986.

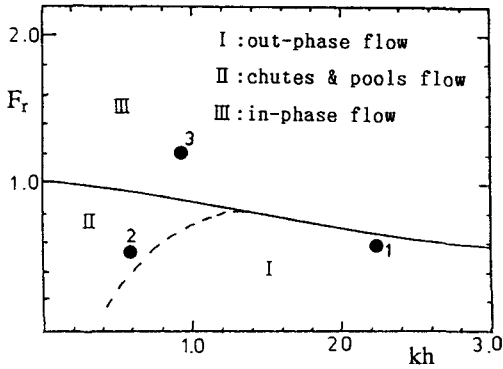
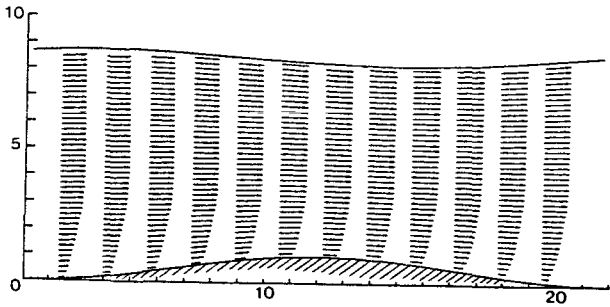
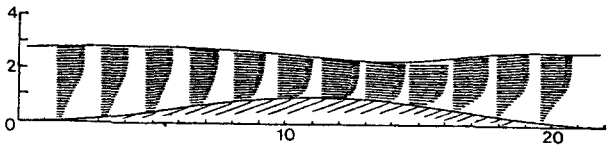


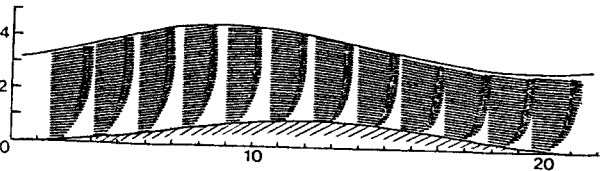
図 1 水面形の形成領域



(a) $Fr=0.588$, $kh=2.23$



(b) $Fr=0.552$, $kh=0.583$



(c) $Fr=1.20$, $kh=0.913$

図 2 水面形と流速分布の計算結果