松江高専 正会員 〇木村 一郎 京都大学 正会員 細田 尚

1. 目的

せん断混合層における流れはK-H不安定に起因する組織渦構造に特徴付けられる.開水路の場合には底面, 水面, 側壁等の影響を受けるため現象はより複雑となる. Uiittewaal ら¹⁾は水深の異なる開水路せん断混合層 について実験を行い、組織渦の流下方向への発達・減衰過程と水深の影響を明らかにした. すなわち、水深が 小さい方が底面からの乱れの影響を強く受けるため、組織構造がより早く減衰することを明確に示している. 一方,木村ら²⁾は水深積分ゼロ方程式モデルの枠組みの中で乱流の取り扱いに独自の修正を試み,Chuら³⁾の

実験の再現計算を試みた結果、ほぼ妥当な結果を得てい る. そこで、このモデルを Uiittewaal らの実験に適用し、 組織構造とその水深依存性に対する適用性を検証する.

В₁ U. B₂ Splitter plate U_2 図1 対象とする流れ場の模式図

2. 数値解析モデル

数値解析モデルは木村らが Chu らの実験の再現に用いたものと同様であり,構成則は次の通りである².

$$-\overline{u_i u_j} = D_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \lambda_p \frac{u_*^3}{h} D_t \sum_{\beta=1}^3 C_\beta \left(S_{\beta ij} - \frac{1}{3} S_{\beta \alpha \alpha} \delta_{ij} \right), \quad D_t = \alpha(M) h u_*$$
(1)

$$S_{1ij} = \frac{\partial U_i}{\partial x_{\gamma}} \frac{\partial U_j}{\partial x_{\gamma}}, \quad S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_{\gamma}}{\partial x_i} \frac{\partial U_j}{\partial x_{\gamma}} + \frac{\partial U_{\gamma}}{\partial x_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_{\gamma}} \right), \quad S_{3ij} = \frac{\partial U_{\gamma}}{\partial x_i} \frac{\partial U_{\gamma}}{\partial x_j} \tag{2}$$

モデル係数は全てストレイン、ローテイションパラメータの関数であり、次のように与える. $C_{1} = 0.4 f_{M}(M), C_{2} = 0, C_{3} = -0.13 f_{M}(M), \quad f_{M}(M) = [1 + 0.02M^{2}]^{-1}, \quad \alpha(M) = \min[0.2, \ 0.3\gamma_{k}\lambda_{p}/(1 + 0.09M^{2})] \quad (3)$

$$S = \lambda_p \frac{h}{u_*} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)^2}, \quad \Omega = \lambda_p \frac{h}{u_*} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)^2}, \quad M = \max[S, \Omega]$$
(4)

3. 対象とする流れ場と計算条件

対象とする流れ場は Uiittewaal らの実験¹⁾における条件であり、図1と表1にその概要を示す.計算格子は 直交不等間隔格子であり、等比級数分布を用いて作成した.格子数は437(x方向)×80(y方向)とした.

4.計算結果とその考察

(1) 流速分布と自己相似性

Uijttewaalらは横断距離y及び主流流速Uを次のよ に無次元化したとき、流下距離によらず流速分布が相 似となること (self-similarity) を指摘している.

う	Case I	14 cm/s	32 cm/s	150 cm	150 cm	67 mm

 U_2

(large h)		32 GH/S	150 Cm	150 GH	07 11111
Case II (small h)	11 cm/s	23 cm/s	150 cm	150 cm	42 mm

表1 流れ場の水理条件(Uijttewaal & Booij の実験条件)

B₁

 B_2

h (depth)

(5)

 $y'=y/\delta$, $U'=(U-U_1)/(U_2-U_1)$, $\delta=(U_1-U_2)/(\partial U/\partial y)_{max}$, (δ:運動量層厚) ここに、U₁, U₂は各断面における混合層両側の乱れていない流速の値である.図2は実験¹⁾及び数値解析にお ける h=67mm の場合の無次元化流速分布である.実験結果ではあきらかに self-similarity が満たされている.

しかし、計算結果では splitter plate のごく近傍である x=5cm の断面の流速分布は他の断面の分布から大きく逸 れている. それ以外の領域については数値解析においても self-similarity が満たされており、実験結果と適合 している.h=42mmの場合は紙面の都合で図を省略したがほぼ同様な結果が得られている.

(2) 乱れ強さの分布特性とその水深依存性

図3は,主流方向流速の乱れu'のRMSを運動量層厚で無次元化された横軸に対してプロットしたものである. まず、h=67mmの実験結果¹⁾に着目すると、各断面において明瞭なピークが存在する.計算結果においてもこ

キーワード せん断混合層, K-H 不安定, 水深積分モデル, ゼロ方程式モデル, 乱流組織構造

連絡先 〒690-8518 松江市西生馬町14-4 松江高専 環境·建設工学科 TEL0852-36-5212 のようなピークが認められるが, 流下に従って生じるピークの減 衰が実験と比較してより早く生じ ている.これは,数値解析の下 流端条件の影響によるものと考 えられる.一方,h=42mmのケー スでは,h=67mmの場合に比べ て実験のピークの値が小さく, また,流下に伴うピーク値の減衰も 早い.これは,底面からの乱れの影 響によって組織構造がより早い段 階で減衰に転じるためであり,数値 解析もほぼこの特徴を捉えている.

(3) スペクトルの比較

図 4 は,実験および数値解析に おける横断方向の流速変動 v'のス ペクトルを示したものである. h=67mmの実験結果では,各断面 において明確なピークが存在し,そ の値は,上流から x=5.75m の断面

 H_z

 $|H_z|$

 $E(m/s)^2/$

までは増加しており、その 後、減衰に転じている.ま た、ピークの周波数は流下 とともに減少しおり、これは、 組織渦が合体を繰り返しな がらその規模を大きくする 過程に対応するものと考え られる.計算ではこのような 傾向をほぼ良好に再現し ている.また、実験ではピ ークの高周波側の勾配が -5/3ではなく-3となってお り、このような特性も数値解 析結果ではある程度再現 されている. h=42mm の実



験結果では,最も上流のx=0.05mのピーク値が最大で,その下流側は減衰領域となっている.数値解析ではx=2m付 近までピーク値が増幅し,その後減衰に転じる点が異なっている.この原因は不明であり,さらに検討が必要である. 参考文献

1) Uijttewaal & Booij: Effects of shallowness on the development of free-surface mixing layers, Physics of Fluids, Vol.12, pp.395-402, 2000. 2) 木村・細田:開水路せん断混合層の流れ構造に対する水深積分型修正ゼロ方程式 モデルの適用性,水工学論文集,第48巻, pp.673-678, 2004. 3) Chu & Babarutsi: Confinement and bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers, J. Hydraulic Eng., ASCE, Vol.114, No.10, pp.1257-1274, 1988.