# <水深と流量の時間変化を伴う開水路乱流の数値解析>

< Numerical Analysis of Depth-Varying Unsteady Open Channel Turbulent Flows>

禰津家久,京都大学大学院環境地球工学専攻,京都市左京区吉田本町,nezu@nezu.gee.kyoto-u.ac.jp 牛島 省,京都大学大学院環境地球工学専攻,京都市左京区吉田本町,uhijima@nezu.gee.kyoto-u.ac.jp 山上路生,京都大学大学院環境地球工学専攻,京都市左京区吉田本町,sanjou@nezu.gee.kyoto-u.ac.jp Iehisa Nezu, Dept.of.Civil&Global Envir.Eng., Kyoto Univ., Kyoto-shi Sakyo-ku Yoshida-honmachi Satoru Ushijima, Dept.of.Civil&Global Envir.Eng.,Kyoto Univ Michio Sanjou, Dept.of.Civil&Global Envir.Eng., Kyoto Univ

In this paper, numerical analysis of unsteady open-channel flows was carried out by a low Reynolds number k- model, involved with the anisotropic turbulence modeling, and VOF method. The distributions of ensemble averaged velocity, turbulence intensity, and Reynolds shear stress have been obtained in the whole flow region from the wall to the time-depending free surface. The values of these calculations coincide well with LDA database of Nezu et.al(1997,ASCE). Further, the turbulent energy budget in depth-varying unsteady flows, which is difficult to be measured, has been calculated and it has been predicted that the generation of turbulence lack in unsteady open channel.

#### 1.はじめに

本研究では水深と流量が時間的に変化する鉛直2次元場 の滑面非定常開水路流れを対象に数値計算を行い,従来の実 験ケース ¹( Table 1 )と比較することでその精度を検証した. さらに実験による測定が難しい空間的な速度および圧力値 の分布や乱れエネルギー収支の時間変化特性を算出した.

#### 2.計算方法

(1)計算モデル ここでは、次式で示される Abe2)らの低レイ ノルズ数型 k- モデルを用いて粘性底層を含む領域を計算 対象とした.さらに非等方乱流モデル3を用いて乱れ強度と 乱れエネルギーを計算した.また自由表面の計算には VOF (Volume of Fluid)法 4,5)を用いた.一般に VOF 法では計 算格子を占有する液体の割合  $F(0 \le F \le 1)$  の移流方程式を 解くことで自由水面の時空間変化を計算するが,数値的な誤 差から液体内部の格子においてもF < 1となる場合があり, 精度の低下や発散を招く、そこで本計算では米山・守屋 5 に 従い,質量保存条件の厳密化を図った.なお運動方程式の移 流項の差分スキームには比較的高精度なQUICKを適用した. Fig.1 に計算格子図を示す.計算領域は鉛直方向に不等間隔 格子を採用し,粘性底層での計算を可能とするために底面か らの第一格子点高は  $y^+ = U_* y/v < 0.5$  を満たすように設定 した.計算はLを流下方向計算区間長とすると $L/h_{\!\scriptscriptstyle h}\cong 20$ までの長さについて行い,速度分布および乱れ分布等の考察 で用いる値はx/L=0.9 の測定点の値である.

(2)境界条件 一般に非定常開水路流れでは、水深と速度の ピーク時刻に時間差 $T_{lag}$ が生じることが知られている (Fig.2). 本研究ではこの $T_{lag}$  にレーザー流速計 (LDA)に よる実験値1)を適用して速度-水深の流入条件を与えた.また, 流入圧力には静水圧分布を,流入速度に関しては対数則を用 い,kおよび $\varepsilon$ に関しては禰津の普遍関数 $^{6}$ を与えた.また 流出境界には,自由流出条件を適用した.底面境界には Non-slip 条件を与えた.

#### 3.計算結果

(1)速度分布特性 Fig.3 に無次元時刻  $T = t/T_{lag}$  で整理した 鉛直方向速度分布の時系列特性を実験結果とともに示す. a)外層 定常状態では,速度分布はほぼ水面まで対数則に

Table. 1 Calculation Case

case	$T_d$	$U_b$	$U_p$	$h_b$	$h_p$	$\alpha$ ( × 10 <sup>-4</sup> )
S1		20.0				2.90
S2	60	30.0	58.0	4.0	6.6	0.98
S3	90	30.0	58.0	4.0	6.6	0.73
S4	120	30.0	58.0	4.0	6.6	0.49

 $T_d(s)$ : duration from the base to peak discharge

 $U_b(\text{cm/s})$ : bulk-mean base velocity

 $U_p(\text{cm/s})$ : bulk-mean peak velocity

 $h_b(cm)$ : base depth  $h_p(cm)$ : peak depth

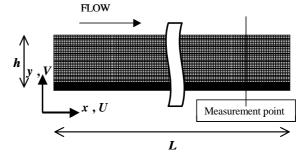


Fig.1 Calculation Region

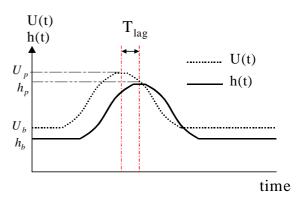


Fig.2 Time lag between the peak time of U(t) and h(t)

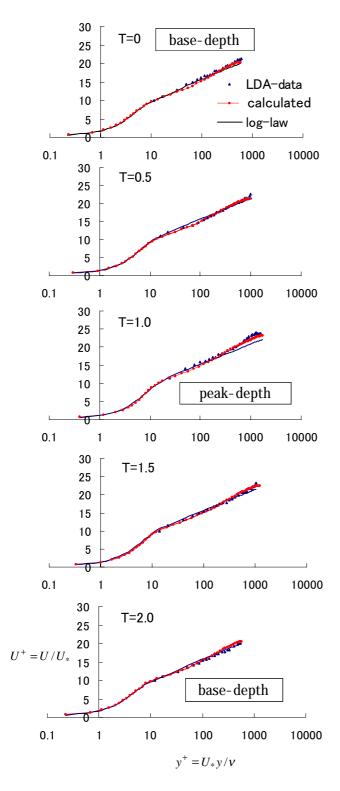


Fig.3 Mean Velocity Profiles against T

従うが,流量が増加し水深がピークになるにつれて,水面近傍で対数則のずれが生じ,実験結果でみられる非定常流の速度分布特性と良好に一致している.

b)内層 バッファー層では実験結果と同様,非定常時においても非定常効果が直接現れず,速度分布の普遍特性がほぼ保たれることがわかる.

# (2) 乱れ分布特性

 ${
m Fig.4}$  は無次元乱れ強度  $u'/U_*$  の水深方向分布特性を示した

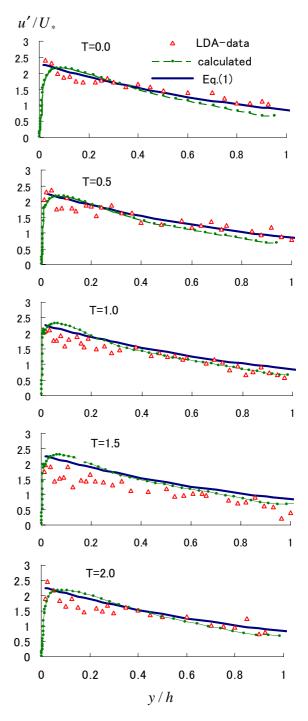


Fig.4 Distribution of  $u'/U_*$ 

ものである .図中の曲線は式(1)で表される等流状態での禰津の普遍関数 ®を示している . これらの値は各時刻の摩擦速度で無次元化すれば , 増水期・減水期を通じて等流時と同様に普遍性を保つことがわかり , 従来の実験結果と同様の傾向を示している .

$$\frac{u'}{U_*} = 2.30 \exp\left(-\frac{y}{h}\right) \tag{1}$$

# (3) 流下方向の速度および圧力の分布特性

Fig.5 は, $y/h_b=0.5$ の計測点における主流速U および圧力 P の流下方向分布を示したものである. U は増水期

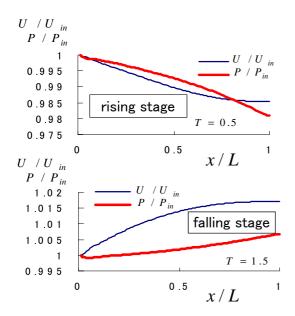


Fig.5 Spatial Structure of Streamwise Velocity U and Pressure P

(T=0.5) では空間的に減速し,減水期 (T=1.5) では空間的に加速する. 同様に P も増水期では空間的に減少し,減水期では空間的に増加することがわかる.

### (4) 乱れエネルギー収支特性

Fig.6 は式(2)で定義する乱れエネルギーの発生率Gとそのエネルギー散逸率 $\varepsilon$ の関係 $G/\varepsilon$ を時間変化とともに示したものである.定常状態(T=0)では従来の知見 $^n$ どおり,底面極近傍を除く内層でGが卓越( $G/\varepsilon$ >1)が存在し,外層で不足( $G/\varepsilon$ <1)するが,流量が増加するにつれて内層では平衡領域(G=1)が現れ,水深ピーク時(T=1)には全領域にわたってGが不足することがわかる.さらに減水期には再び内層において平衡領域が現れ,等流時(T=2)には内層においてエネルギー過剰領域が現れる.これは流量増加に伴い,流れが空間的に減速されて $\varepsilon$ 方程式の生産項が等流時より大きくなることで $\varepsilon$ が増加したことが原因と考えられる.

$$G = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \tag{2}$$

# 4.おわりに

本研究における非定常開水路流の数値計算は,実験値との比較から非定常流の内部特性を比較的高精度に再現できることがわかった.また実験では測定が難しいエネルギー収支特性や各物理量の空間分布の解明が可能となり将来的にその有用性はさらに大きくなるものと思われる.

## 参考文献

- (1) Nezu, I., Kadota, A. and Nakagawa, H.: Turblent structure in unsteady depth-varying open channel flows, *J.Hydraulic.Eng*, ASCE, vol. 123, pp. 752-763, 1997
- (2) 西島勝一: 非等方 k- モデル,生産研究, vol.43, pp.20-pp.27, 1991
- (3) Abe, K., Nagano, Y., and Kondo, T.: Numerical prediction of separating and reattaching flows with a modified low-Reynolds-number *k*-model, *J.Wind Eng.*, vol.52, pp.213-218,1992.

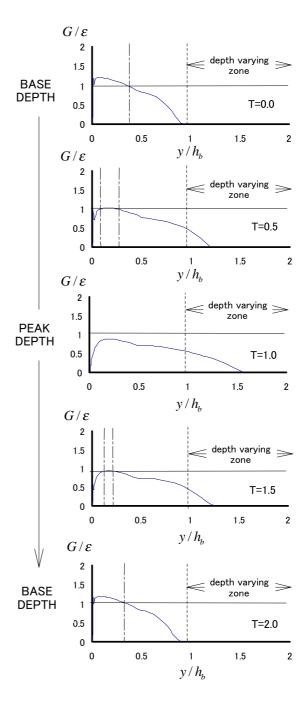


Fig.6 Distribution of Turbulent Budget against T

- (4) Hirt, .C.W. and Nicholds, B.D.: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *J.Comp.Phys*,vol.39,pp.201-225,1981
- (5) 米山望・守屋祥一: VOF 法を用いた自由液面の数値解析 法水工学論文集,第39巻pp.373-378,1995
- (6) 禰津家久: 開水路流の乱流構造に関する基礎的研究,京都大学博士論文,1977.
- (7) Nezu, I. And Nakagawa, H: Turbulence in Open channel flows, *IAHR-monograph*, Balkema, Publishers, Netherlands, 1993