

京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 フェロー 橋津 家久

京都大学大学院工学研究科環境地球工学専攻 正会員 牛島 省

京都大学大学院工学研究科博士後期課程 学生員 ○山上 路生

1. はじめに

流量変化、水深変化を伴う非定常開水路流れの水理特性を把握することは防災上、極めて重要である。高精度測定機器の開発により非定常開水路流れの内部構造が次第に明らかにされてきたが、実験手法による非定常開水路流の解析は多大な労力とコストを要する。そこで本研究では、非定常開水路乱流の諸特性の解明に数値計算手法を用いる。具体的には応力方程式モデルと VOF 法を用いて水深変化を伴う鉛直 2 次元場の非定常乱流計算を行う。また計算値の検証のために高精度レーザ流速計を用いた実験を行い、相互比較を行った。

2. 計算方法と計算条件

水深の変化を鉛直 2 次元および 3 次的に計算するためには自由表面計算モデルの導入が必要となる。本研究では VOF 法¹⁾を適用して水面の時空間分布を計算した。また乱流モデルには応力方程式モデル(本研究では LRR モデル²⁾)を用いた。表-1 に計算条件を示す。 α は非定常性の大きさを表すパラメータであり式(1)で定義される。流れ場は等価砂粗度 $k_s = 1.5\text{cm}$ の粗面開水路乱流である。流入口には三角波で変化する流速を与えた。流出口では流速に関しては自由流出条件を与え、水深はベース水深で固定した。底面流速境界は粗面对数則および壁関数を用いた。また、実験の計測地点と同一条件にするために上流から約 7m ($x/h_b = 175$) の地点に検査面を設け、ここでの計算値を以下の考察に用いる。

$$\alpha = \frac{1}{(U_b + U_p)/2} \frac{h_p - h_b}{T_d} \quad (1)$$

3. 計算結果と考察

図-1 に摩擦速度 U_* で無次元化した平均速度分布の時間変化を実験値とともに示す。計算値および実験値はともにベース・ピーク水深時において、外層では wake が観察されるが、内層では対数

表-1 計算および実験条件表

case no.	T_d	h_b	h_p	U_b	U_p	k_s	$\alpha (\times 10^{-3})$
1	60	4.0	6.0	75	100	1.5	0.38
2	90	4.0	6.0	75	100	1.5	0.25
3	120	4.0	6.0	75	100	1.5	0.19

$T_d(\text{s})$: ベース水深からピーク水深までの増水時間

$U_b(\text{cm/s})$: ベース水深時の断面平均流速

$U_p(\text{cm/s})$: ピーク水深時の断面平均流速

$h_b(\text{cm})$: ベース水深 $h_p(\text{cm})$: ピーク水深

$k_s(\text{cm})$: 等価砂粗度

則とはほぼ一致し、非定常流れにおいても無次元速度分布は対数則に従うという実験結果を再現できた。図-2 に摩擦速度で無次元化した主流方向乱れ強度 u'/U_* の分布特性の時間変化を示す。図中の曲線は等流時の橋津の普遍関数である。これらの分布は速度分布と同様に非定常流れ場においても普遍性を保つことがわかる。図-3 に $y/h_b = 0.5$ における流速

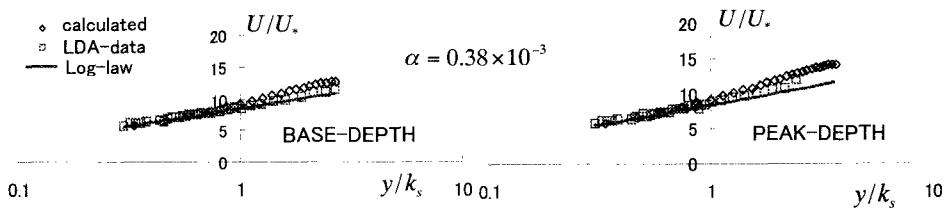


図-1 平均速度分布 (左: ベース水深時, 右: ピーク水深時)

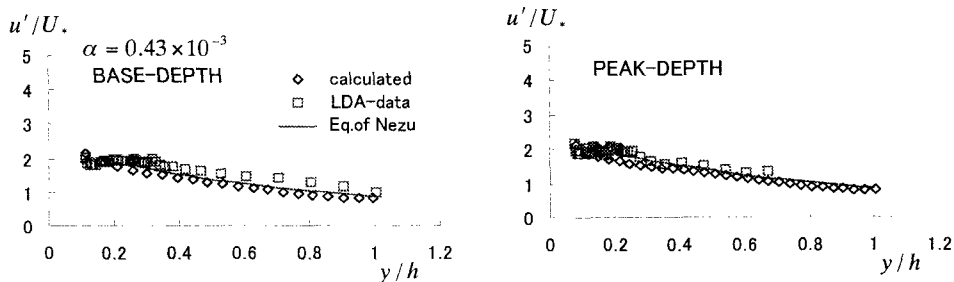


図-2 無次元主流方向乱れ強度分布 (左: ベース水深時, 右: ピーク水深時)

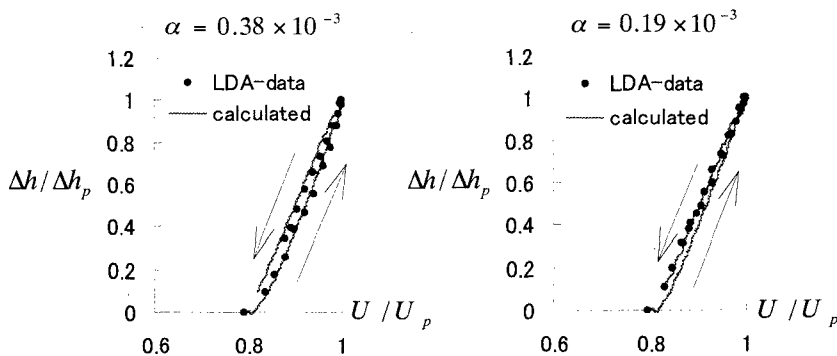


図-3 ループ特性

U と水深 h の時間変化を示す。計算値、実験値はともに反時計周りのループを描いており実河川の洪水流で観察されるループ特性を再現できた。また計算値は、非定常性が大きいほどループの面積が大きくなるという実験値と同様の傾向を示している。

4. おわりに

応力方程式モデルと VOF 法を用いて非定常開水路乱流の内部特性やループ特性を良好に再現することができ、数値計算的なアプローチが十分可能であることが示された。今後は実験では考察が困難な非定常流の空間構造や波形の時空間的な変化特性の予測を行っていきたい。

参考文献 1) Hirt, W. and Nichols, B.D.: Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *J. Comp. Phys.*, vol. 39, pp. 201-225, 1981. 2) Launder, B.E., Reece, G. J. and Rodi, W.: Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure, *J. of Fluid Mech.*, vol. 68, pp. 537-566, 1975.