

II-58 開水路乱流および管路乱流の比較

東北大学大学院 学生員○石井義裕

東北大学工学部 学生員 栗山幸久

東北大学工学部 正 員 沢本正樹

1. 序論

開水路流れの特徴は自由水面が存在することである。その流速分布、乱流構造を議論する場合、開水路流れをその水深の2倍の流路を持つ管路として扱うことも便宜的には行なわれている。さらに、水面近くでの乱れの減衰を考慮した乱流モデルの提案もなされている¹⁾。しかしながら、自由水面の力学的役割は単純なものではない。本研究では、同じレイノルズ数の開水路流と管路流、および、これに円柱の後流を重ねたときの流れの乱流計測を行ない、さらにこれらの乱流への $k-\varepsilon$ モデルの適用性を比べ検討し、自由水面の力学的特性が乱流構造に与える影響を調べることを目的としている。

2. 実験装置および方法

実験には、幅36cm・高さ6cm・長さ10mの長方形断面を持つ、勾配1/200の透明アクリル製循環式水路を用いた。水路下流には水位調整用の可動堰を設けた。測定断面は、上流より5mの位置で水路横断方向中央とした。実験はほぼ同じレイノルズ数を持つ開水路と管路について、等流の場合と流れに円柱（ $\phi=3.2$ cm）の後流を重ね合わせた場合を行なった。円柱は流速測定部上流45cmの位置、水路横断方向中央に設置した。実験条件を表-1に示す。開水路においては水深を h_0 、管路においては水深を $2h_0$ とした。流速は二成分を同時に測定できるレーザ・ドップラ流速計を用いて前方散乱方式で測定した。データは、サンプリング周波数 100Hzで、 x 方向・ y 方向が同時に有効なデータ6000個をA/D変換した。

3. 流速測定結果

(1)等流の場合：1次元の $k-\varepsilon$ モデルを用いて開水路流に対する適応性を検討する。

①方程式：以下の3方程式を、Crank-Nicholson Scheme を用いて計算した。

$$\frac{\partial U}{\partial t} = g \sin \theta + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C \varepsilon_1 C \mu k \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - C \varepsilon_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) \quad (3)$$

差分格子を、 $\Delta y=0.1$ cm, $\Delta t=0.005$ secとした。 U, k, ε が時間的に変化しなくなったものを収束解とした。式(1),(2),(3)にある定数は $C \mu=0.09$, $C \varepsilon_1=1.44$, $C \varepsilon_2=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ とした。

②初期条件：第一格子点 y_0 を $y^* = y U_* / \nu = 50$ とする。流速分布は、実験値を初期値として用いた。乱れエネルギーおよび散逸率の初期値を次のように与えた。

$$\frac{k_0}{U_*} = \frac{1}{\sqrt{C \mu}} = 3.33 \quad \varepsilon_0 = \frac{U_*^3}{\kappa y_0} \quad (4)$$

③境界条件：管路の管軸中央では、流れが対称になること（対称条件）を開水路にも適用すると、

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

一方、流れが底面から一定の勾配で水面まで到達していることを考慮すると

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

を境界条件とした場合を検討した。

図-1に平均流速分布を示す。開水路では底面から対数則に従って自由水面まで分布している。管路では、底面から対数則に従って分布しているが、 $y/h_0 \geq 0.8$ では流速勾配が0になっていることが特徴であ

る。これは、管路では上下の壁面から流速が決っていくのに対し、開水路では底面からのみ流速が決まっているように見える。実験値と計算値を比較すると、管路では実験値は底面から対数則に従い分布しており、管軸中央では計算における対称条件を満たしている。一方、開水路では実験値は底面から水面まで対数則に従い水面まで分布しており、対称条件を用いた計算値は $y/h_o \geq 0.8$ で実験値より小さな値を示している。分布勾配を考慮した境界条件を用いた場合には、自由水面付近でも実験値と一致している。図-2、図-3に乱れエネルギー(k)、散逸率(ε)の分布を示す。乱れエネルギーは $k=0.75(u^2+v^2)$ として評価した。実験値は乱れエネルギー・散逸率ともに開水路では自由水面で値が減衰している。計算値は管路では対称条件を満たしているが、開水路では対称条件の場合、実験値より小さな値であり勾配条件を使用の方がよい結果を得る。しかし、勾配条件では自由水面付近での乱れの減衰を表わせていない。

(2)後流を流れに重ね合わせた場合。

図-4に乱れ強度($\sqrt{uu}$)の分布を示す。管路では等流の場合、管軸に向かうに従って減少している。一方、後流を重ねた場合、 $y/h_o=0$ から $y/h_o=1$ まで一様に乱れており後流の性質が顕著に認められる。開水路では等流の場合、自由表面に近づくにしたがって減少している。後流を重ね合わせた場合、自由水面付近では乱れ強度が変化せず、後流の性質が残っているようであるが、 $y/h_o \leq 0.5$ では壁面乱流が発達しており後流の影響を打ち消しているようである。図-5に乱れ強度($\sqrt{vv}$)の分布を示す。管路では後流の場合が等流の場合より乱れが大きくなっており、管軸に向かうにしたがい増加している。一方、開水路では等流の場合も後流の場合も乱れの大きさはほぼ同じである。

4. 主要な結論

管路と開水路では、平均流速・乱れ強度分布において以下のように、明かな違いが存在する。①平均流速分布については、管路における対称条件を開水路において使用すると実際の現象を表わすことができない。②開水路では、管路に対して自由水面で乱れエネルギーが減衰している。③後流を重ね合わせた場合、開水路では壁面乱流の成長が後流を打ち消している。

<参考文献> (1) 祢津家久・中川博次：自由水面を考慮した開水路乱流の数値計算法--修正 $k-\varepsilon$ 乱流モデルによる解法--，京都大学防災研究所年報，第29号B-2, pp.647-673, 1976。

表-1 水理条件

実験ケース		h _o (cm)	R (cm)	U _{max} (cm/s)	U _o (cm/s)	U _* (cm/s)	Re ×10 ⁴	Fr
開水路(等流)	○	2.15	1.92	81.38	69.56	3.17	5.3	1.52
管路 (等流)	●	3.00	2.57	77.19	75.34		5.4	1.61
開水路(後流)	△	2.00	1.80	64.11	57.15	2.99	5.9	
管路 (後流)	▲	3.00	2.57	68.60	62.20		6.4	

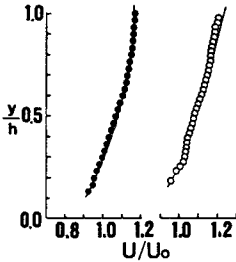


図-1 平均流速

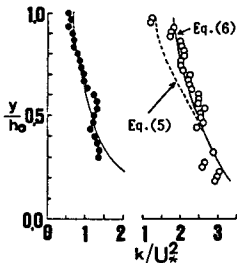


図-2 乱れエネルギー

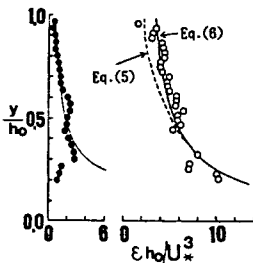


図-3 散逸率

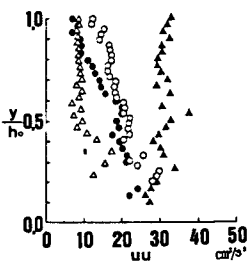


図-4 u u 分布

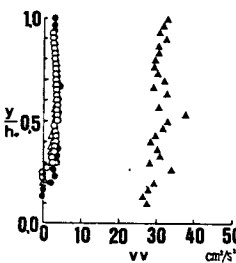


図-5 v v 分布