

開水路および閉管路における乱流構造の比較

Comparison between Turbulence Structure in an Open Channel and in a Closed-Duct

東北大学大学院 石井 義裕 Yoshihiro ISHII

東北大学工学部 沢本 正樹 Masaki SAWAMOTO

Structure of turbulence is compared to study dynamic effects of free surface in open channel flows and in duct flows. Two types of turbulence are measured with Laser Doppler Anemometer, one is uniform flow and the other is in wake flow. A visualization technique is also utilized to observe the bursting phenomena. The applicability of the $k-\epsilon$ model is checked in cases of open channel flow and duct one. The following are concluded. (1) A conventional symmetric boundary condition is inapplicable at free surface in open channel flow. (2) The wake decays faster in open channel flow than in duct flow and the structure of wall turbulence recovers.

Keyword: turbulence, free surface, open channel, $k-\epsilon$ model, bursting

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⁾自由水面は、単純にシェアフリーの境界であるばかりではなく、大規模な乱流構造を制約する、波動としてのエネルギー伝搬性を持つ、などの力学的特性を持っている。本研究では、同じレイノルズ数の開水路流と閉管路流、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、また、可視化によりバースティングに及ぼす自由水面の影響を調べ、さらにこれらの乱流への $k-\epsilon$ モデルの適用性を比較検討し、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

(1) 実験装置および実験方法

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。水路の上流には整流板とハニカムを持つ助走区間を設け十分に整流した。水路の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閉管路について、等流の場合と流れに円柱($\phi=3.2\text{cm}$)の

表-1 水理条件

CASE	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
閉管路(等流)	3.00	1.80	77.19	75.34		5.4	1.61
開水路(後流)	2.00	2.57	64.11	57.15	2.99	5.9	
閉管路(後流)	3.00	2.57	68.60	62.20		6.4	

$$U_o = \frac{1}{h_o} \int_0^{h_o} U dy, \quad Re = \frac{4 U_o R}{\nu}, \quad Fr = \frac{U_o}{\sqrt{g R}}$$

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。ここで、開水路においては水深を h_0 、閉管路においては水深を $2h_0$ とした。

(2) 流速測定

流速測定は、二成分を同時に測定できるレーザー・ドップラー流速計(KANOMAX製)を用いて前方散乱方式で行なった。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変換して統計量(U, V, uu, vv, uv)を求めた。ここで、座標系は流下方向にx、これに垂直上向きにyとした。瞬間流速、平均流速および変動流速は、それぞれ $U, \bar{U}, u$ とし $U = \bar{U} + u$ である。

(3) 可視化

可視化には蛍光染料注入法を用いた。トレーサには蛍光性を有しているメチレンブルー水溶液とズダンレッド水溶液を用いた。トレーサは開水路では水路の下壁に設けられた小孔から、閉管路では水路の上下壁の小孔から一定の流速で滴下した。小孔は、流速測定部の上流45cm・水路横断面中央部に設けた。水路上方より撮影用ライトをあて、水路側面からVTRカメラを用いて水路縦断面方向に撮影した。撮影間隔は1/30sで、この間に1/250sの電子シャッターを用いた。このVTR画像を、大型計算機センターの画像処理システム(ISOP)を用いて処理した。

3. 可視化実験結果および考察

(1) 開水路

写真1~4は連続した4フレーム(1/30sec)の画像である。写真-1右側でバースティングが発生しトレーサが上昇し始めた。写真-2では、バースティングが水面に到達している。写真-3では、そのまま自由水面まで到達したまま流下していく。トレーサは自由水面のみに抑制されており、自由水面まではバースティングは自由に成長している。写真-4では、バースティングが崩壊しており、まわりの流体と混合している。

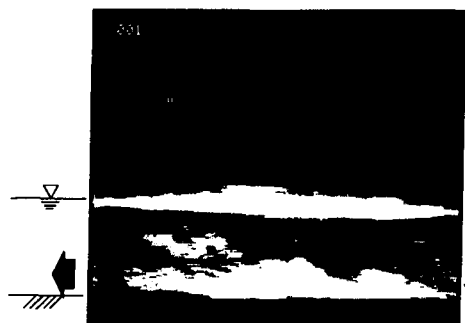


写真-1

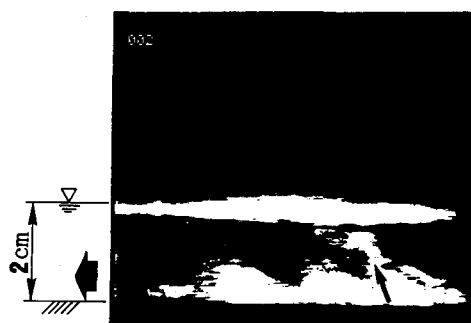


写真-2

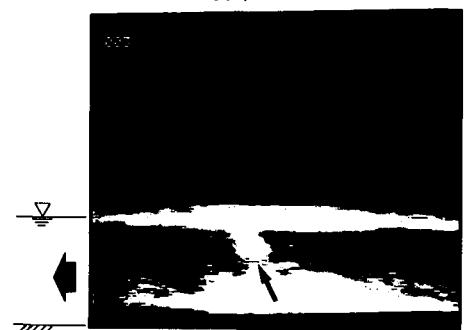


写真-3

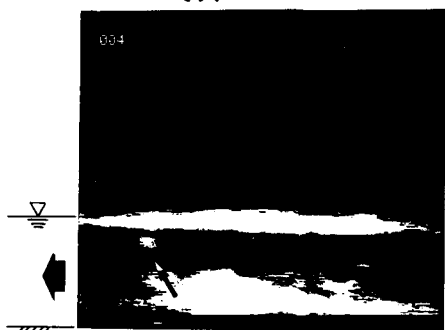


写真-4

(2) 閉管路

写真5～8は連続した4フレームの画像である。写真-5右側で上下の壁面から生じたバースティングは管軸中央に向かって成長していく。写真-6, 7, 8では、管軸中央付近で底面から成長したバースティングと反対側から生じたバースティングが互いに衝突したまま流下している。閉管路では、開水路における自由水面が存在しないかわりに、反対の壁面から成長したバースティングが底面から生じたバースティングの成長を抑制している。

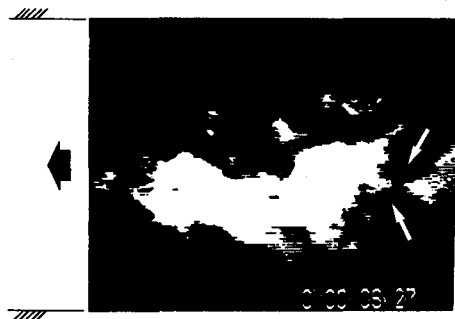


写真-5



写真-6



写真-7

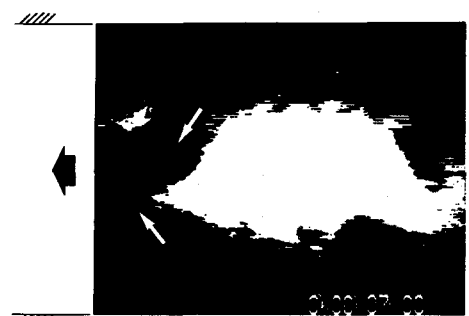


写真-8

4. 流速測定結果および考察

[1] 等流の場合

(1) 平均流速

図面は、閉管路では管軸中央を軸として生じている現象がほぼ対称になっているので、 $0 \leq y/h_0 \leq 1.0$ の範囲だけを表示した。また、図面中で使用した記号の一覧を表-2に示す。

表-2 記号一覧

実験ケース	U	$\sqrt{uu}$	$\sqrt{vv}$
開水路 (等流)	○	□	△
閉管路 (等流)	●	◇	▽
開水路 (後流)	—	■	▲
閉管路 (後流)	—	◆	▼

図-1は平均流速分布(U)を壁法則で示したものである。図中の実線は、

$$\frac{U_p}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(U_* y / \nu) + 5.5, \quad \kappa = 0.41$$

を示したものである。開水路では底面から対数則にしたがって自由水面まで分布している。アスペクト比

は13.0と十分に大きいので、最大流速点は $y/h_0=1.0$ にある。閉管路では、底面から対数則にしたが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的である。これは、閉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みえる。

(2) 乱れ強度

図-2に乱れ強度分布($\sqrt{uu}$, $\sqrt{vv}$)を示す。 $\sqrt{vv}$ の分布は閉管路・開水路ともに $y/h_0=0$ から $y/h_0=1.0$ まで一様に乱れている。一方、 $\sqrt{uu}$ の分布は開水路および閉管路ともに $y/h_0=0$ から $y/h_0=1$ になるにしたがい減少している。しかし、 $y/h_0=0.6$ から自由水面付近では開水路は閉管路に比べ乱れが大きい。

(cm/s)

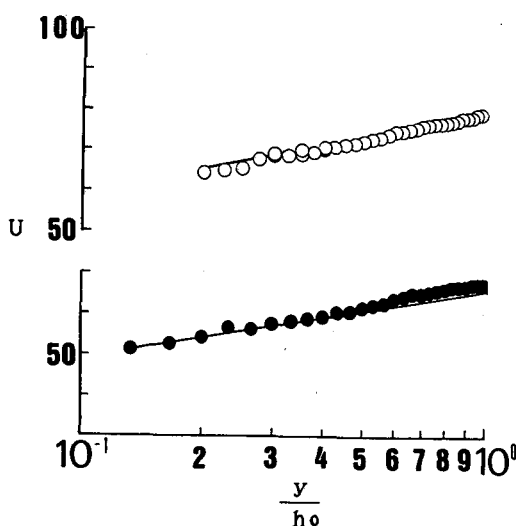


図-1 対数分布則

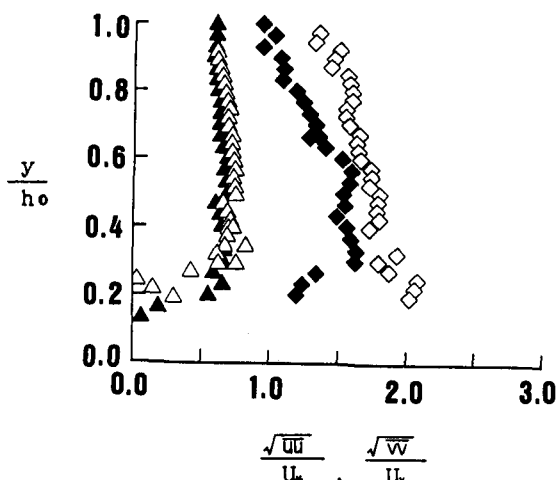


図-2 乱れ強度分布

(3) $k-\varepsilon$ モデルを用いた計算

数値解析法としては主なものに $k-\varepsilon$ モデル¹⁾、応力モデル、LESなどがあるが、ここでは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

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

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

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

の3本の方程式を、Crank-Nicholson Scheme を用いて差分化して計算を行なった。差分格子は、 $\Delta y = 0.1\text{cm}$ 、 $\Delta t = 0.01\text{sec}$ 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、表-3とした。

表-3 定数表

$C \mu$	$C \varepsilon_1$	$C \varepsilon_2$	σk	$\sigma \varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

②初期条件

第一格子点 y_p を $y^+ = 50$ ($y^+ = y U_* / \nu$) とする。流速分布では、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として、

$$\frac{k_p}{U_*} = \frac{1}{\sqrt{C \mu}} = 3.33 \quad (4)$$

$$\varepsilon_p = \frac{U_*^3}{\kappa y_p} \quad (5)$$

とした。

③境界条件

閉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、

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

となる。

図-3 に平均流速分布における実験値と計算値の比較を示す。図中の実線は、境界条件として対称条件を用いて1次元の k - ε モデルを用いて計算したものである。閉管路では底面から対数則に従い分布しており、管軸中央では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、計算値は $y/h_0 \geq 0.8$ では実験値より小さな値を示している。対称条件は満たしていない。水面の条件として対称条件を用いることは実際の現象を表していない。

(4) 乱れエネルギー

図-4 に乱れエネルギー (k) の分布を示す。ここで、 w は計測していないので、 $k = 0.75 (u^2 + v^2)$ として評価した。開水路では閉管路に比べ自由水面付近では乱れエネルギーが大きくなっている。したがって開水路では自由水面の影響で乱れの減衰が抑えられていることがわかる。計算値は、実験値より大きな値を示しているが、これは、実験値の乱れエネルギーの評価、すなわち、 w の評価が大きいものと考えられる。

[2] 後流の流れに重ね合わせた場合。

(1) 乱れ強度 ($\sqrt{uu}$)

図-5 に乱れ強度 ($\sqrt{uu}$) の分布を示す。閉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、 $y/h_0 = 0$ から $y/h_0 = 1$ 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、 $y/h_0 \leq 0.5$ 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。

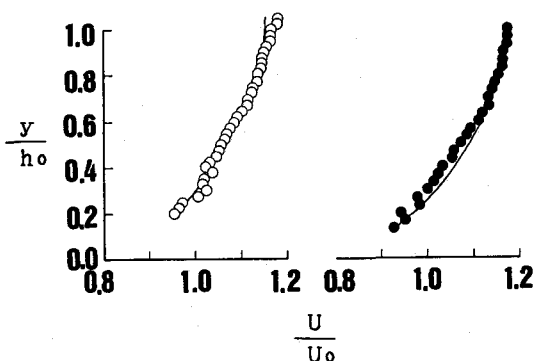


図-3 平均流速分布

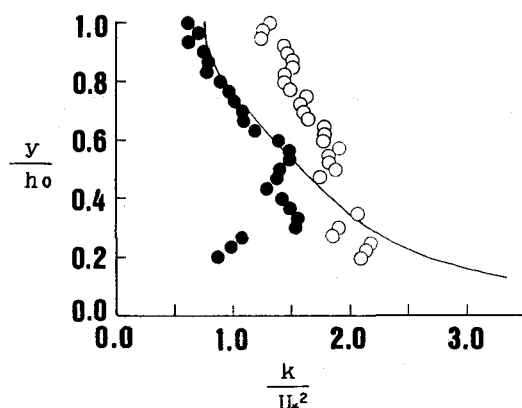


図-4 乱れエネルギー

(2) 乱れ強度 ($\sqrt{w}$)

図-6に乱れ強度 ($\sqrt{w}$) の分布を示す。閉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。

5. 主要な結論

閉管路と開水路では、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、閉管路における対称条件を開水路において使用することは実際の現象を表わしていない。
- ②開水路では、閉管路に対して自由水面で乱れエネルギーの減衰が抑制されている。
- 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。
- ④閉管路では、底面からのバースティングに加え反対側の壁面からのバースティングの影響も生じている。

本研究をおこなうにあたり、東北大学技官 佐藤 栄司氏、4年生 栗山幸久君の助力を得た。ここに謝意を表します。

<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。

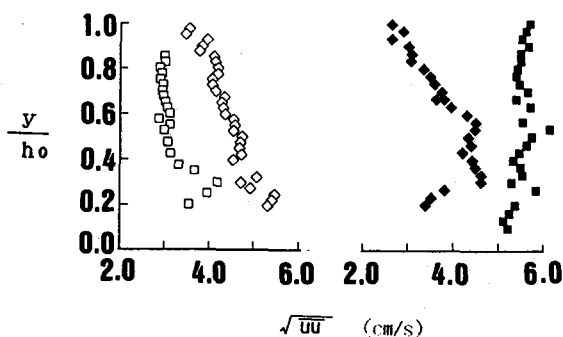


図-5 乱れ強度 ($\sqrt{uu}$) 分布

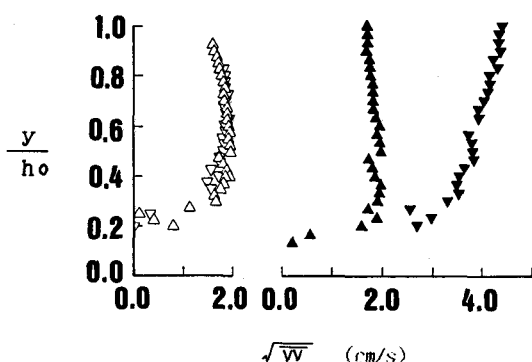


図-6 乱れ強度 ($\sqrt{w}$) 分布