

人工わんどの開口部長さが与える流れと水交換の影響に関する検討

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○高田 晋良
 名古屋工業大学 正会員 富永 晃宏
 名古屋市 久田 陽史

1.はじめに 近年、生態系の保全の重要性が認識され、多自然型川づくりが注目されている。その中の一つとして河道の中に存在する止水域、わんどが挙げられる。主流部に比べ、流れが穏やかであることなどから、多様な空間を創造することが可能であり、人工わんどでは生態系環境の効果を期待されている。わんどがこのような生態学的な役割を維持するための水理的課題がいくつか挙げられるが、その中の一つでわんど内の水質悪化を防止することに注目すると、わんどと本流との適度な水交換は必要不可欠である。このような観点から、本研究では開口部に遮蔽を設けるという条件でのわんどにおける流れ構造および水交換について実験、数値計算によって検討した。

2.実験条件 実験水路は、長さ 4m、幅 30cm、勾配 1/2000 のアクリル製長方形断面水路を用い、水路右岸をアクリル板により遮蔽し、一区間のみ解放区を設けることでわんどとした。わんどの形状は開口幅 15cm、奥行き 10cm とし、アスペクト比（開口幅/奥行き）を 1.5 とした。流量 2l/s、水深はわんど域の主流部で 4cm となるよう調節した。開口部の遮蔽として高さ 5cm、厚さ 1cm のアクリル板を用いた。実験ケースを図 1 に示す。流速計測には、PIV 可視化装置を用い、高速ビデオカメラを用いて 1/120s で撮影された可視化画像を、相互相関法により画像解析し、約 16 秒間の流速ベクトルデータを取得した。濁度計測には、従来の濁度計による計測ではなく、静止画像から RGB 値を取得するプログラムによる画像処理を用いた。このプログラムは 1 枚の静止画像を濃淡の情報として数値化できることや、1 回の計測で多数のポイントでの濁度経時変化を得ることが可能である。計測はわんどと主流域の境界上を遮蔽しわんど内を染料により着色し、濃度が均一になった状態で遮蔽を取り除き、主流域とわんど域との拡散を開始する。遮蔽を取り除いた時間を計測開始時間とし、染料が十分なくなるまで、ビデオ撮影を行った。

3.数値計算手法 本研究で用いた水深平均の連続式および開水路浅水流方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Uh}{\partial x} + \frac{\partial Vh}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 h は水深、 U, V はそれぞれ主流、横断方向の水深平均流速、 τ_{bx}, τ_{by} は底面せん断応力である。水深平均レイノルズ応力 $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ は渦動粘性係数 ν_t を用いて次式で表される。

$$\tau_{xx} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} k \cdot \tau_{yy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} k \cdot \tau_{xy} = \rho \nu_t \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

ここで、 k は乱れエネルギー、 C_μ は定数 (=0.09)、 f_μ はモデル関数、 ε は乱れエネルギー逸散率であり、 k および ε は Launder-Sharma の低レイノルズ $k-\varepsilon$ モデルを採用し次の輸送方程式を解いてえられる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial Uk}{\partial x} + \frac{\partial Vk}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - (\bar{\varepsilon} + D) + P_{kv} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} + \frac{\partial U\bar{\varepsilon}}{\partial x} + \frac{\partial V\bar{\varepsilon}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial y} \right) + c_1 f_1 \frac{\bar{\varepsilon}}{k} G - c_2 f_2 \frac{\bar{\varepsilon}^2}{k} + E + P_{Ev} \quad (7)$$

ここに、 G は乱れエネルギー発生率であり、 D, E, f_1, f_2 はモデル関数、 $c_1, c_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ は係数、 P_{kv}, P_{tv} は水深

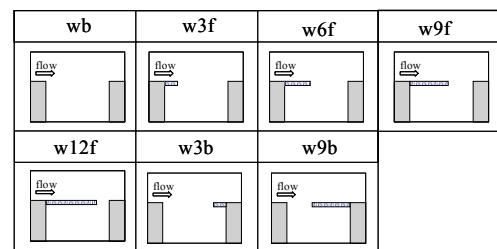


図 1 実験ケース

表 1 モデル関数

D	E	f_μ	f_1	f_2
$2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2$	$2\nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right)^2$	$\exp \left[\frac{-3.4}{(1+R_i/50)^2} \right]$	1.0	$1 - 0.3 \exp(-R_i^2)$

キーワード わんど、水交換、数値計算

〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学工学部社会開発工学 Tel. 052-735-5490

平均に伴う生成項である。また、水交換現象を調べるために次の拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uc) + \frac{\partial}{\partial y}(Vc) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (8)$$

ここで、 σ_t は拡散シュミット数である。方程式の離散化には有限体積法を、移流項にはハイブリット法、時間項には完全陰解法を用い、圧力補正は SIMPLE 解法で行った。

4.実験結果と数値計算の検討 図2, 図3, に PIV 実験による平均流速ベクトル, 上流奥の濁度の経時変化をそれぞれ示す。wb ではわんど全体に循環渦が形成される。上流側を遮蔽したケース, w3f~w12f では遮蔽が長くなるにつれて, 渦は小さくなり, w12f では明確な循環渦は形成されず, 拡散速度も非常に小さくなる。下流側を遮蔽したケース w3b では wb と比べて乱れた大きな流れが流入し, 拡散も早くなる。これは, 流入部である開口部下流側で遮蔽を設けたことにより, わんど入口, 下流側での圧力が高まりわんど内の流れを促進したと考えられる。ケース w3b のレイノルズ応力分布図を見ると, わんどの境界上から下流奥まで大きな乱れが確認できる。また, w9b では流入する流れは w9f と比べ大きくなったが下流側で循環が起こらないため, 拡散する早さはあまり変わらない。図4 に数値計算における濁度の経時変化図を示す。これにより数値計算の再現性について検討すると, w3b の拡散が実験値と比べ遅くなっているものの, その他はよく再現されているといえる。図5 に数値計算による平均流速ベクトルを示す。計算値は実験値をよく再現しているが, w9b の下流側に渦ができ, 流速を過剰評価している。

5.結論 上流開口部を遮蔽したわんどでは遮蔽が長くなるにつれて循環渦が小さくなり, 拡散も遅くなる。下流側を遮蔽したわんど, 特に遮蔽が短いものの流れ構造は流速が早く乱れた流れになり, 複雑で興味深い。遮蔽が長くなると, 上流側遮蔽ではわんど内全域で水循環が行われるのに対して下流側遮蔽では遮蔽された下流側で拡散が遅くなるという違いがみられた。また, 数値計算では, 低レイノルズモデルを用いることにより, ケースによっては若干の誤差があるものの, 全体的には流速, 濃度変化ともに実験を良好に再現できたといえる。

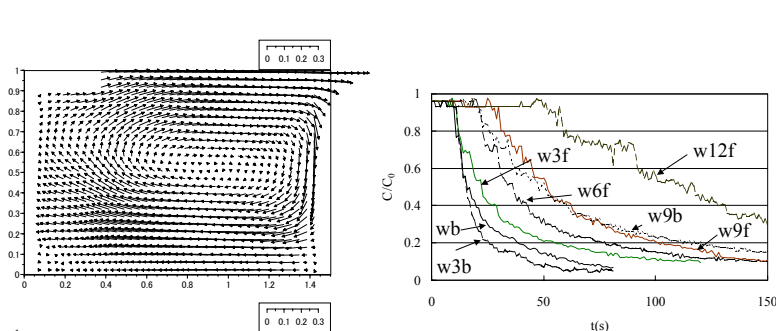


図-3 濁度実験による濁度の経時変化図

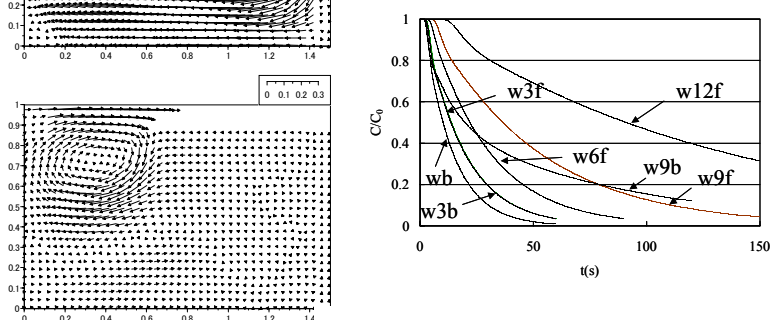


図-4 数値計算による濁度の経時変化図

図-2 PIV 実験による平均流速ベクトル図 (上から w3f, w3b, w9f)

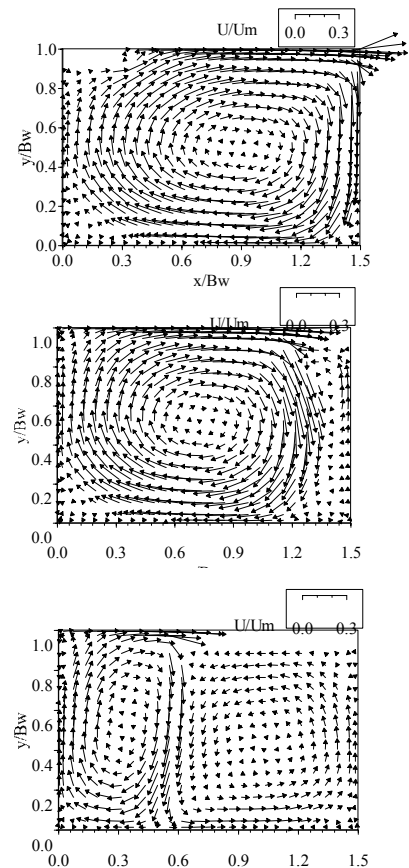


図-5 数値計算による平均流速ベクトル図 (上から w3f, w3b, w9f)