

(Ⅱ-1)

複断面水路内に発生する水平渦の特性

中央大学大学院

学生員 ○武内 慶了

中央大学大学院

学生員 本永 良樹

国土交通省九州地方整備局 正会員

海野 修司

中央大学理工学部

正会員 山田 正

1. はじめに: 実際の河川に多く見られる複断面開水路において、植生や低水路・高水敷境界部(以下、境界部と呼ぶ)では底面せん断力の差による横断方向の主流速差が原因となり、周期的な大規模渦が発生し、横断方向の運動量輸送や物質輸送に寄与する。著者らは直線複断面水路内の流れを2次元数値計算により表現し、低水路・高水敷境界部で発生する水平渦の特性について検討した。

2. 基礎式と計算条件: 運動方程式は(1)、(2)式に示す2次元不定流の基本式を用いた。(3)式は連続式である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2 M}{h^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} + \varepsilon \left(\frac{\partial M^2}{\partial^2 x} + \frac{\partial M^2}{\partial^2 y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2 N}{h^{7/3}} \sqrt{M^2 + N^2} + \varepsilon \left(\frac{\partial N^2}{\partial^2 x} + \frac{\partial N^2}{\partial^2 y} \right) \quad (2)$$

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

ここに、 t :時間(sec), x :流下方向(m), y :横断方向(m), M, N : x, y 方向の流量フラックス(m^2/s), u, v : x, y 方向流速(m/s), g :重力加速度(m/s^2), h :水深(m), η :水位(m), n :Manning の粗度係数($s \cdot m^{-1/3}$), $\varepsilon (= \kappa u_* h/6)$:水平方向渦動粘性係数(m^2/s), κ :カルマン定数($=0.4$), u_* :摩擦速度(m/s)である。また図-1は計算に用いた水路形状であり、表-1に示すような条件で計算を行なった。

3. 計算結果の妥当性: 図-2はRUN-1の計算結果から、主流速横断分布と水位コンターの一例を示したものである。境界部付近で左岸右岸に交互に水平渦が発生していることがわかる。図-3は境界部における主

流速から見た相対流速ベクトル図(RUN-1の計算結果)である。これにより境界部では横断方向の主流速差から水平渦が発生していることがわかる。

3.1 テーラーの凍結乱流の仮説

本研究で行った計算結果をもとにテーラーの凍結乱流の仮説を調べた。ここで

は、一例としてRUN-1の計算結果を用いた。流下方向流速の空間平均値を右岸側境界部付近における移流速度であるとする、右岸境界部より0.5[m]低水路側における平均移流速度 $\bar{U} = 0.629[m/s]$ であった。右岸側境界部における横断方向流速の流下方向分布のスペクトル解析結果は波長を表し $L=40[m]$ と推定することができる。上流から2000[m]下流における右岸境界部の横断方向流速時系列のスペクトル解析は渦の周期を表し $T=70[sec]$ を得る。水平渦の流下速度 $C[m/s]$ は(4)式か

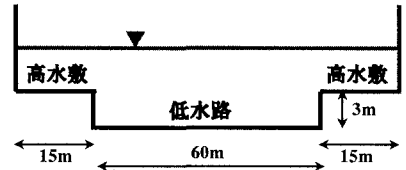


図-1 計算に用いた水路の横断面図

表-1 水路形状と計算条件

	流量 $Q[m^3/s]$	高水敷 n_2
RUN-1	518.0	0.100
RUN-2	621.6	0.100
RUN-3	725.2	0.100
RUN-4	828.8	0.100
RUN-5	900.0	0.030
RUN-6	900.0	0.050
RUN-7	900.0	0.075

すべての計算条件において、水路長 $L=3000[m]$ 、水路床勾配 $1s=1/1000$ 、低水路 $n_1=0.015$ を用いている。

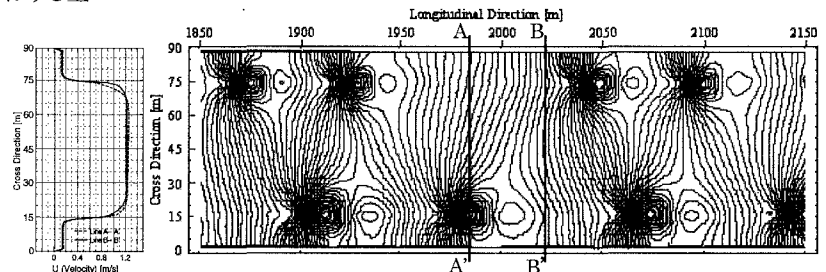


図-2 主流速の横断分布と水位コンター図の一例(上流から1850m～2150m区間)

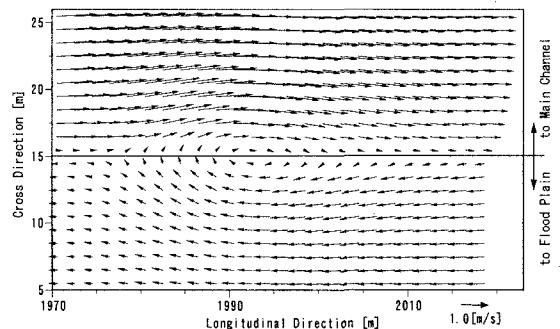


図-3 境界部主流速から見た流速ベクトル図の一例

キーワード：水平渦、変曲点不安定、テーラーの凍結乱流の仮説、2次元数値計算

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 中央大学理工学部 TEL03(3817)1805, FAX03(3817)1803

ら求まるので、流れの移流速度と水平渦の流下速度の比は(5)式から求まる。

$$C=L/T=40/70=0.571[\text{m/s}] \quad (4) \quad , \quad C/\bar{U}=0.571/0.629=0.908 \quad (5)$$

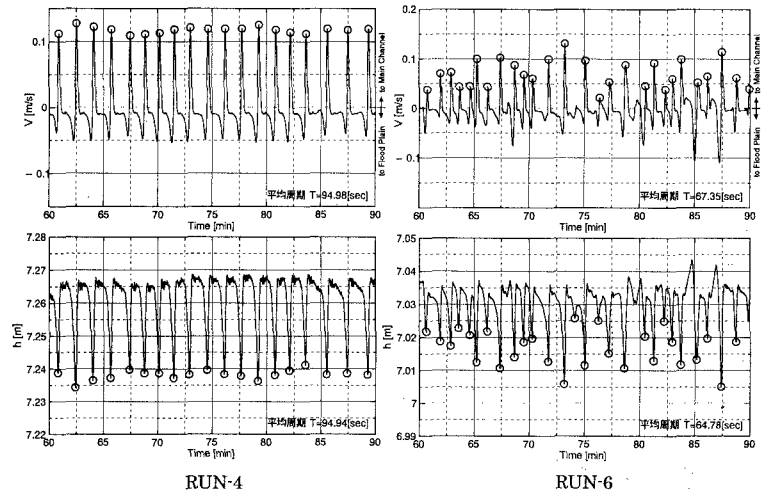
(5)式より水平渦の流下速度は境界部より0.5[m]低水路側における平均移流速度の0.91程度であることがわかった。

4. 解析結果: 図-4の左図はRUN-4の、右図はRUN-6の計算結果から、上流から2000[m]における右岸境界部の横断方向流速と水深の時系列を示したものである。RUN-4では水平渦の発生が周期的であるが、RUN-6では決定論的な基礎式を用いているにもかかわらずカオス的挙動を示した。計算の範囲内で水平渦がカオス的パターンで発生したのは高水数平均主流速が0.4~0.45[m/s]程度以上のときであった。

本研究では、水平渦の通過に伴った急激な水深低下の間隔の平均値を平均周期と呼ぶ。図-5は流速差と平均周期の関係を示している。流速差とは、低水路中央部における主流速と高水数における流下方向流速の平均値との差である。流速差が大きいほど周期が短くなる傾向が顕著に表れている。図-6は変曲点における主流速の横断方向勾配と周期の関係である。変曲点における主流速の横断方向勾配が大きいほど変曲点不安定性が強くなり水平渦の発生周期が短くなる傾向がある。これは、低水路と高水数の流速差がただ大きいだけでは渦の発生周期に大きく影響せず、むしろ変曲点における流速差の横断方向勾配が水平渦の発生周期に影響していることを示している。

5. まとめ: 本研究で得られた知見を以下に示す。(1)横断距離に比べ水深が十分に小さい場合、浅水流近似した平面2次元の基礎式で十分に流れの乱れ構造を表現することができる。(2)水平渦は境界部より0.5[m]低水路側における平均移流速度の0.91程度で流下している。(3)決定論的な基礎式を用いているのにも係らず、水平渦の発生が周期的である場合とカオス的である場合がある。(4)横断方向の流速差が大きい程水平渦の発生周期が短くなる。(5)変曲点における主流速の横断方向勾配が大きくなるほど変曲点不安定性が強くなり、水平渦の発生周期が短くなる傾向がある。

参考文献: 1) Tamai N., Asaeda T., Ikeda H.: Study on generation of periodical large surface eddies in a composite flow, Water Resour. Res., 1986. 2) 福岡捷二, 藤田光一: 複断面河道の抵抗予測と河道計画への応用, 土木学会論文報告集, 411号, pp.63-72, 1989. 3) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋: 側岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集, 443号, pp.47-54, 1992. 4) 池田駿介, 村山宣義, 空閑健: 複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造, 土木学会論文集, 509号, pp.131-142, 1995. 5) 池田俊介, 空閑健: 複断面直線開水路流れに発生する大規模水平渦列の安定性と運動量輸送に関する実験的研究, 土木学会論文集, 558号, pp.91-102, 1997.



RUN-4

RUN-6

図-4 境界部における横断方向流速と水深の時系列

流量と高水数粗度係数の違いによって、水平渦の発生が周期的である場合(左図)とカオス的である場合(右図)とがあることがわかる。計算の範囲内で、水平渦がカオス的パターンで発生したのは高水数平均主流速が0.4~0.45[m/s]程度以上のときであった。
水平渦の通過に伴った急激な水深低下の間隔の平均値を平均周期と呼ぶ。

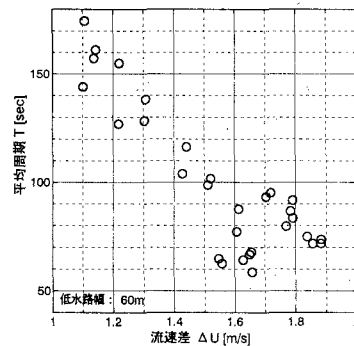


図-5 流速差と平均周期の関係

横断方向の主流速差が大きいほど水平渦の発生周期が短くなる傾向が顕著に表れている。

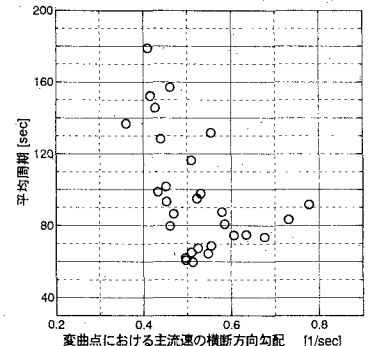


図-6 変曲点における主流速の横断方向勾配と平均周期の関係

変曲点における主流速の横断方向勾配が大きくなるほど変曲点における不安定性が大きくなり、水平渦の発生周期が短くなる傾向がある。