

複断面直線開水路の低水路・高水敷境界部に発生する水平渦の特性

中央大学大学院 学生員 ○大東 憲司
 中央大学大学院 学生員 武内 慶了
 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：複断面河道は日本の河川中流部に多く見られ、その河道における洪水流の乱れを正確に把握することは河道維持等において極めて重要な要素である。洪水流の乱れの中でも、植生境界や低水路・高水敷境界部においては、横断方向の主流速差が主な原因である。それによって大規模な水平渦が生じる。著者らは、複断面開水路流れにおける大規模水平渦の挙動を詳細に把握することを目的とする。

2.計算条件と基礎式：洪水流の再現計算を行うにあたり、本研究では運動方程式に決定論的な基礎式である2次元不定流の基本式(1),(2)式と、(3)式に示す連続式を用いた。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[m²/s]、 u, v : x, y 方向流速[m/s]、 g :重力加速度[m/s²]、 h :水深[m]、 η :水位[m]、 n :Manningの粗度係数[s・m^{-1/3}]、 ε ($=\kappa u_* h/6$):水

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

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3) \quad \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{N} \right) + u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h}{N} \right) = 0 \quad (4)$$

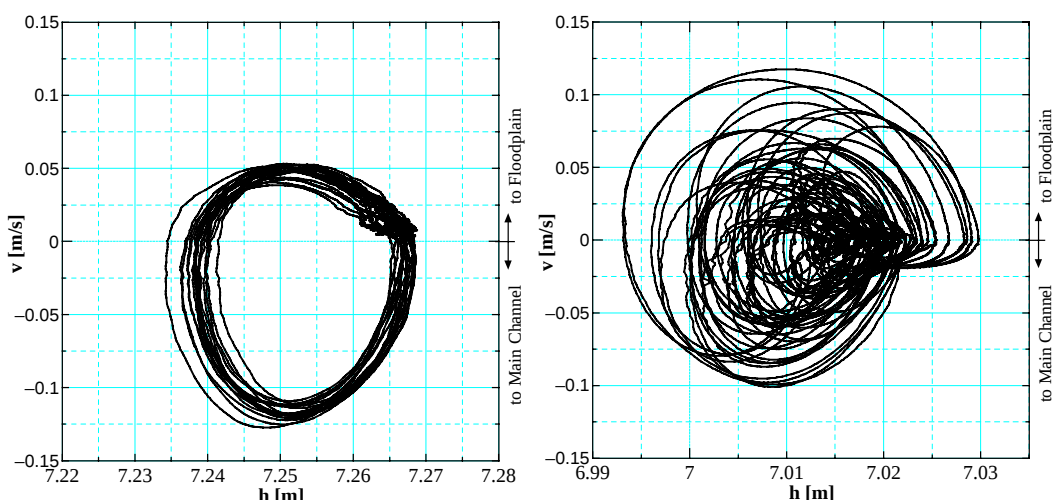
表-1 数値計算に用いた水路形状と計算条件

		低水路幅 [m]	高水敷幅 [m]	高水敷 高さ[m]	流量 [m ³ /s]	高水敷 粗度係数	水平渦 の挙動
Run-00	両側高水敷	60.0	15.0	3.0	518.0	0.100	周期的
Run-01	両側高水敷	60.0	15.0	3.0	828.8	0.100	周期的
Run-02	両側高水敷	60.0	15.0	3.0	900.0	0.050	カオス的
Run-03	片側高水敷	50.0	50.0	3.0	1000.0	0.040	カオス的
Run-04	片側高水敷	50.0	50.0	2.5	1000.0	0.040	カオス的
Run-05	片側高水敷	50.0	50.0	1.5	1000.0	0.040	カオス的
Run-06	片側高水敷	50.0	50.0	0.5	1000.0	0.040	周期的
Run-07	片側高水敷	50.0	50.0	0.0	1000.0	0.040	周期的
Run-08	片側高水敷	100.0	100.0	0.0	1000.0	0.060	周期的
Run-09	片側高水敷	100.0	100.0	0.0	1000.0	0.080	周期的
Run-10	片側高水敷	100.0	100.0	0.0	1400.0	0.040	周期的

平方方向渦動粘性係数[m²/s]、 κ :カルマン定数[=0.4]、 u_* :摩擦速度[m/s]である。基礎式の離散化には、未知数である M, N, h を交互に配置し、2次精度の差分を用い、陽的に解いた。運動方程式中、非定常項は前進差分、移流項は流れ方向に対して後退差分、水面勾配項は後退差分、拡散項は2階微分の差分公式を施し、連続式中すべての項に前進差分を用いた。数値計算は片側高水敷と両側高水敷の場合で行った。水路形状と計算条件の一例を表-1に示す。上流端境界条件として一定流量を、下流端境界条件として下流端から流体が流れ出る

よう(4)式を与えた。下流端の境界条件の影響が無視できるほど上流側である上流端から0~2000[m]下流の区間を対象としている。またどの計算条件においても、水路長は3000[m]、河床勾配は1/1000、低水路粗度係数は $n_m=0.015$ としている。

3.発達後の水平渦の諸特性：水平渦の周期的挙動、カオス的挙動をより詳細に見るため、境界部における水深 h 、主流速 u 、横断方向流速 v 相互の関係を調べた。その一例として図-1に h と v 関係をアトラクタ表示する。なお、水平渦の周期的挙動の一例として Run-01 の、カオス的挙動の一例として Run-02 のアトラクタを示す。

図-1 水平渦の周期的・カオス的挙動のアトラクタの比較 h と v

る水深 h 、主流速 u 、横断方向流速 v 相互の関係を調べた。その一例として図-1に h と v 関係をアトラクタ表示する。なお、水平渦の周期的挙動の一例として Run-01 の、カオス的挙動の一例として Run-02 のアトラクタを示す。

キーワード 複断面開水路 水平渦 2次元数値計算 主流速差

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学大学院理工学研究科 TEL03-3817-1805

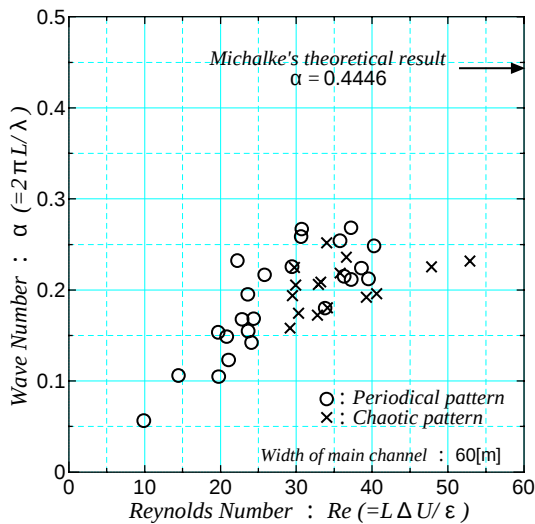


図-2 Reynolds 数と波数の関係

水平渦の波数は Re 数とともに増加していくことが分かる。 Re 数が増加すると水平渦が周期的挙動からカオスの挙動に変化する。 ϵ は主流の動粘性係数である。

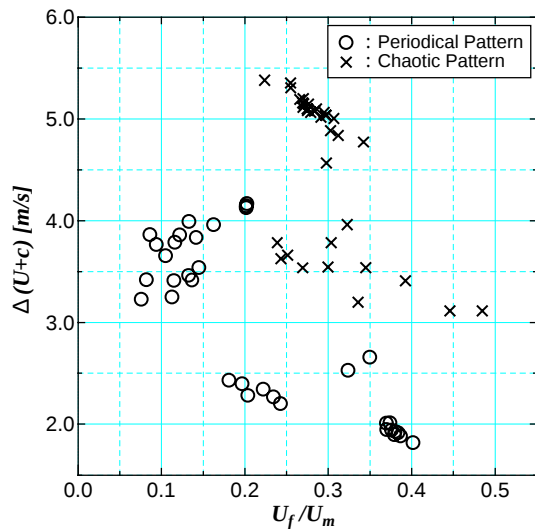


図-3 低水路・高水敷における主流速の比と位相速度を含む主流速差の関係

〔 $U_f U_m$ と $\Delta(U+c)$ がともに増大すれば、水平渦はカオスの挙動を示す〕

$\Delta(U+c)$ がともに増大すれば、水平渦はカオスの挙動を示す。つまり、高水敷主流速が低水路主流速に比べ大きくなれば $U_f U_m$ は大きくなり、かつ主流速差 ΔU は小さくなる。さらに低水路と高水敷の水深差が大きくなれば位相速度差 $\Delta c (= \sqrt{gh_m} - \sqrt{gh_f})$ が大きくなる。この条件を満たせば水平渦がカオスの挙動を示す。高水敷における主流速が大きく、低水路に比べ高水敷上の水深が小さくなれば、 $\Delta(U+c)$ のうち位相速度差が支配的となる。図-4, 5, 6 は Run-04, 05, 06 の上流端から 2000[m] 流下した地点における横断方向流速の時系列を示したものである。これらの図から低水路・高水敷の水深差を縮めることによって水平渦は、カオスの挙動から周期的挙動となる。

4. まとめ: 本研究で得られた知見を以下に示す。1) どの計算条件でアトラクタを表しても水平渦が、周期的挙動を示す場合には帯状の分布を示し、カオスの挙動を示す場合にはある領域内をランダムに分布する。2) 発達後の水平渦の波長は、主流速差と渦動粘性係数に基づく Re 数が増加すると減少し、水平渦は周期的挙動からカオスの挙動へと変化する。3) 水平渦のカオスの挙動は、低水路と高水敷の水深差による位相速度のずれにも起因する。4) 低水路・高水敷の水深差縮めることによって水平渦は、カオスの挙動から周期的挙動となる。

参考文献: 1) 武内慶了・本永良樹・海野修司・山田正: 複断面開水路流れにおける大規模水平渦の発生と発達, 土木学会水工学論文集, 第 47 巻, pp.475-480, 2003. 2) Tamai, N., Asaeda, T., Ikeda, H.: Study on generation of periodical large surface eddies in a composite flow, Water Resour. Res., Vol.22, No.7, pp.1129-1138, 1986. 3) 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.

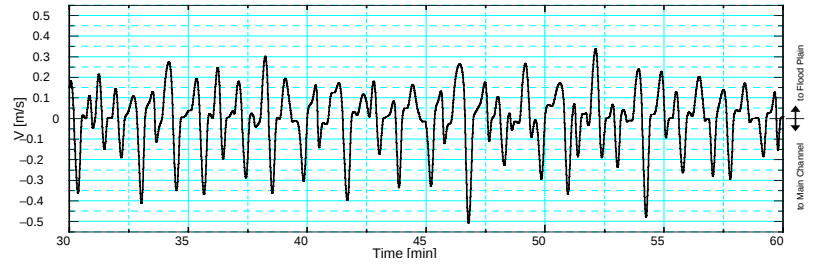


図-4 Run-04 の上流端から 2000[m] 流下した地点における横断方向流速の時系列

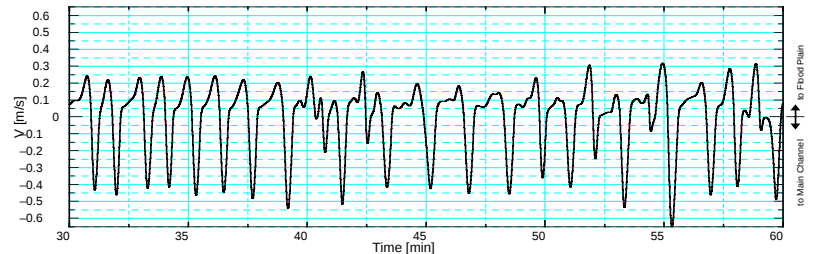


図-5 Run-05 の上流端から 2000[m] 流下した地点における横断方向流速の時系列

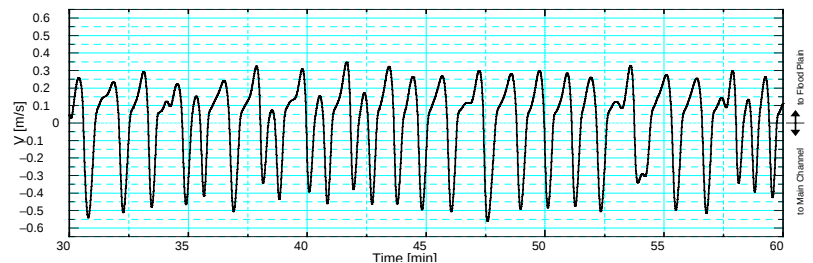


図-6 Run-06 の上流端から 2000[m] 流下した地点における横断方向流速の時系列

として Run-02 の計算結果を用いた。どの計算条件でアトラクタを表しても水平渦が周期的挙動を示す場合には帯状の分布を示し、カオスの挙動を示す場合にはある領域内にランダムに分布することがわかった。

Re 数と波数の関係を図-2 に示す。代表長さ L は運動量厚さの 2 倍の大きさとし、代表流速は主流速差 ΔU とした。これより、 Re 数の増加とともに波数が増加していき、 Re 数が増加すると水平渦は周期的挙動からカオスの挙動に遷移することがわかった。また、水平渦の挙動を区別し、低水路と高水敷における主流速の比 $U_f U_m$ と、位相速度を含む主流速差 $\Delta(U+c)$ の関係を図-3 に示す。 $U_f U_m$ と