

複断面直線開水路における大規模水平渦の発生及びカオス的挙動の発生要因

中央大学大学院 学生員 銭 潮潮
 中央大学大学院 正会員 本永 良樹
 中央大学理工学部 フェロー会員 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では、低水路・植生が生い茂る高水敷境界部(以下、境界部と呼ぶ)において、横断方向の主流速差が原因となり大規模水平渦が発生し、横断方向の運動量輸送や物質輸送に寄与する。これまで、水平渦が低水路・高水敷境界部における平均移流速度の0.91程度で流下する⁽¹⁾ことや、決定論的な基礎式を用いているにも係らず水平渦がカオス的に発生する場合がある⁽²⁾ことを明らかにしてきた。本研究では、2次元数値計算を用いて、複断面開水路において大規模水平渦の発生及び発生した水平渦のカオス的な挙動の発生原因を調べた。

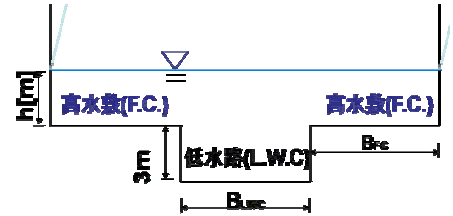


図-1

2.計算条件と基礎式： 図-1は数値計算に用いた複断面直線開水路の横断図である。低水路幅 B_{LWC} [m]、高水敷幅 B_{FC} [m]、流量 Q [m^3/s]を変化させ数値計算を行った。また全ての計算条件において、水路長 4000[m]、水路床勾配 $I_b=1/1000$ 、高水敷及び低水路の粗度係数をそれぞれ $n_f=0.1[s \cdot m^{-1/3}]$ 、 $n_m=0.02[s \cdot m^{-1/3}]$ を用いている。計算

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{h^{7/3}} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (1) \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

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

に用いた基礎式は、2次元不定流の基本式である運動方程式(1)、(2)式と連続式(3)式である。基礎式の離散化には、差分法の陽的解法である Leap Frog 法を用いた。

ここに、 t :時間[sec]、 x :流下方向[m]、 y :横断方向[m]、 M, N : x, y 方向の線流量フラックス[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[$s \cdot m^{-1/3}$]、 $(= u_* h/6)$: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。

3.計算結果とその考察：

3-1.大規模水平渦の発生：

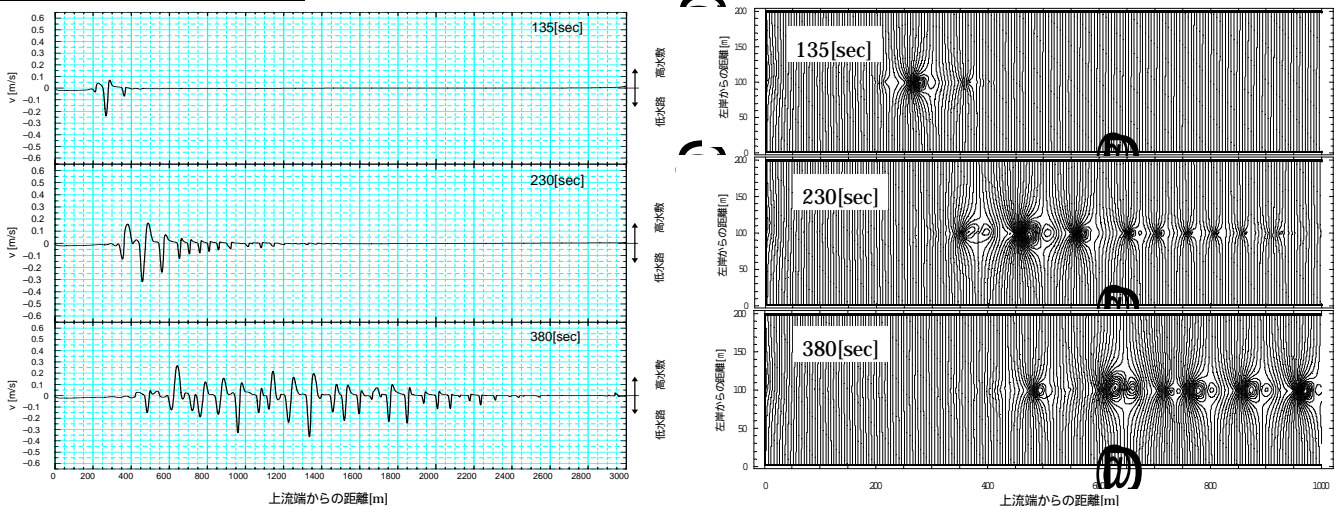


図-2

図-2は計算結果から大規模水平渦の発生から発達に至る現象について示す。図より、以下の3つが分かった。(1)水平渦が上流側で発生し、発生した水平渦は流下と共に個々に発達する。(2)個々に発達し始めた水平渦群の先頭部に新た

な水平渦が発生し始め、それもまた流下と共に発達する。(3)個々に発達した渦は隣り合うものと合併し、更に発達しつつ流下する。数値計算によって横断方向流速の乱れが生じ、水平渦が発生する理由として、計算上の打切り誤差が擾乱の役割となり水平渦が発生したものと考えられる。水平渦発生後、流下と共に個々に発達する場合は規則的な挙動を示すのに対し、隣り合う水平渦と合併後はカオス的な挙動を示す。

3-2. カオスの挙動：

高水敷高さ 3.0m を有する複断面開水路において、発達後の水平渦がカオスの挙動を示したのは、高水敷上の平均流速が 0.4[m/s] 以上の場合であった。ここで、発達後の水平渦がカオスの挙動を示す要因を調べる。水平渦の挙動を区別し、低水路と高水敷のフルード数 (Fr_m, Fr_f) の関係を図-3 に示す。高水敷におけるフルード数が大きくなれば、水平渦はカオスの挙動を示すことが分かった。ここで、 $Fr = U/\sqrt{gh}$ である。高水敷のフルード数が大きくなるには、(1)高水敷における主流速が大きくなる、(2)高水敷上の水深が小さくなる、(3)高水敷における主流速が大きくなり、更に高水敷上の水深が小さくなる。の3通りが考えられる。

水平渦の挙動を区別し、低水路を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-4 に

示す。図中の赤線を境とし、 U_f/U_m と $\Delta(U+c)$ が共に増大すれば、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、且つ主流速差 ΔU は小さくなる。更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。以上のことより、水平渦のカオスの挙動は高水敷の主流速の大きさのみならず、主流と高水敷の水深差による位相速度のずれにも起因することが分かった。

4. まとめ：

- 1) 計算上の打切り誤差が乱れのきっかけとなり、水平渦が上流側で発生し、発生した水平渦は流下と共に発達する。発達した水平渦群の先端の新たな渦が生じる。
- 2) 水平渦発生後、流下と共に個々に発達する場合は規則的な挙動を示すのに対し、隣り合う水平渦と合併後はカオス的な挙動を示す。
- 3) 高水敷におけるフルード数が大きくなれば、水平渦はカオスの挙動を示す。
- 4) 水平渦のカオスの挙動は主流と高水敷の水深差による位相速度のずれにも起因する。

参考文献：

1) 武内慶了, 本永良樹, 海野修司, 山田正: 複断面水路内に発生する水平渦の特性, 第 29 回関東支部技術研究発表会, pp.146-147, 2002. 2) 銭潮潮, 樊建強, 本永良樹, 山田正: 複断面水路における大規模水平渦の特性と流れに対する抵抗, 土木学会第 64 回年次学術講演会, pp.119-120, 2009, 9 3) 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. 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) 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.

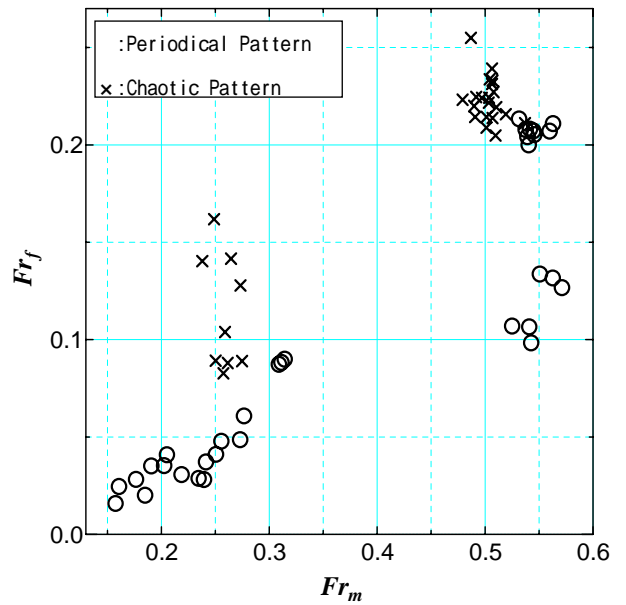


図-3

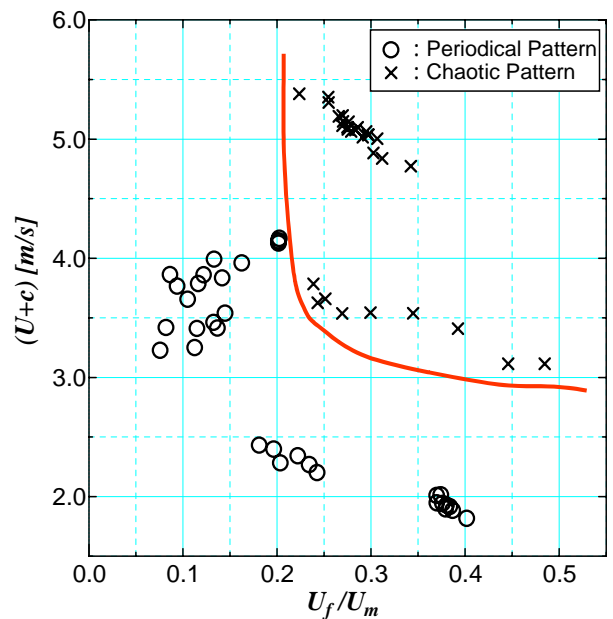


図-4