

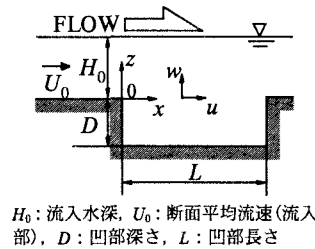
神戸大学大学院 学生員 ○兵頭 伸幸
 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志
 神戸大学工学部 フェロー 神田 徹

1. まえがき

筆者らは、開水路凹部流れを対象として、PIVにより得られた流速値にウェーブレット解析、主成分分析を施し、凹部における流況特性を調べてきた^{1),2)}。本報では、多重解像度近似(MRA)と固有直交関数展開(POD)を複合的に用いる解析法(MR-PO 複合展開)を適用することにより凹部内での循環流や主流-凹部境界での組織運動など乱流構造の主成分を抽出し、それら主成分により凹部流れの時空間構造やレイノルズ数変化の影響について検討を行う。

2. 対象とする流れ場

図-1に、本研究で対象とする開水路凹部の模式図を示す。実験条件は、凹部形状比 L/D ($=4.0$)とフルード数 $Fr = U_0/(gH_0)^{1/2}$ ($=0.35$)を一定とし、レイノルズ数 $Re = U_0H_0/\nu$ を 3050, 12250 と変化した2ケースである。図-2に、PIV計測による瞬時の流速ベクトル $\mathbf{v}(x, z)$,



H_0 : 流入水深, U_0 : 断面平均流速(流入部), D : 凹部深さ, L : 凹部長さ

図-1 開水路凹部

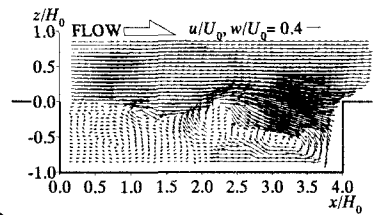


図-2 瞬間流速ベクトルの例 (CASE1, $Re = 3050$)

$\mathbf{v}(x, z, t) (= u(x, z, t), w(x, z, t))$ の例を示す。主流-凹部境界において流速ベクトルは大きく変動しており、せん断混合層が発達している。凹部内の中～下流側には凹部深さ D 程度の空間スケールをもつ渦が存在し、上流側にはそれより小さいスケールの渦が形成されている。

3. 「多重解像度-固有直交関数」複合展開(MR-PO 複合展開)の概要

本研究で用いるMR-PO複合展開の手順を以下に示す。

- ①MRA¹⁾を適用することにより、各計測点での流速時系列 $\mathbf{v}(x, z, t)$ を周波数帯(レベル)別の変動時系列に分解する。得られた各レベルの変動時系列の統計量(変動強度、共分散)を指標として、それら時系列を平均流構造の特徴を保持しつつ低周波で変動する準平均流成分 $\mathbf{V}_L(x, z, t)$ 、せん断混合層での組織乱流成分 $\mathbf{v}_c(x, z, t)$ 、時空間スケールが微小な非組織乱流成分 $\mathbf{v}_s(x, z, t)$ 、の三つの階層に分類・再合成する。
- ②POD²⁾を適用することにより、①で得られた各階層成分をモード分解する。
- ③各階層でのモード m の固有ベクトル $\Phi_m(x, z)$ と振幅 $a_m(t)$ を用いて、凹部流れの時空間構造を検討する。

4. 解析結果と考察

PIVで得られた流速時系列 $\mathbf{v}(x, z, t)$ にMRAを適用することによって、流速を準平均流成分 $\mathbf{V}_L$ 、組織乱流成分 $\mathbf{v}_c$ 、非組織乱流成分 $\mathbf{v}_s$ 、の三層に分解する。図-3は、CASE1($Re = 3050$)における $\mathbf{V}_L(x, z, t)$ 、 $\mathbf{v}_c(x, z, t)$ 、 $\mathbf{v}_s(x, z, t)$ の三層に分解する。図-3は、CASE1($Re = 3050$)における $\mathbf{V}_L(x, z, t)$ 、 $\mathbf{v}_c(x, z, t)$ 、 $\mathbf{v}_s(x, z, t)$ の三層に分解する。

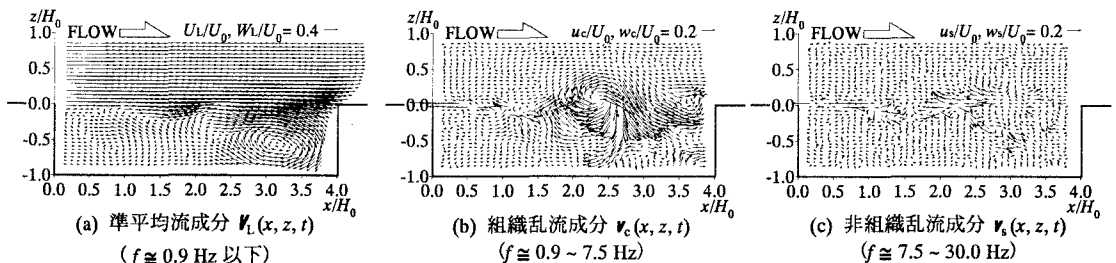


図-3 各階層の成分(CASE1, $Re = 3050$, 図-2に対応)

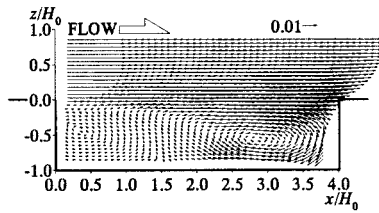
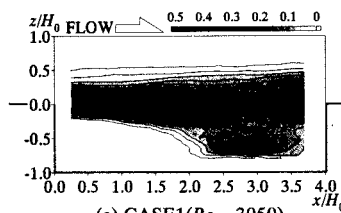
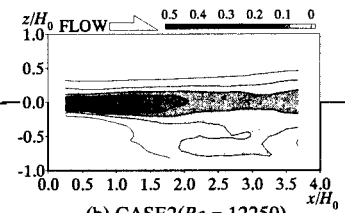


図-4 v_L のモード $m=1$ の固有ベクトル ϕ_{L1}
(CASE1, 寄与率 $c_{L1} = 98.8\%$)



(a) CASE1($Re = 3050$)



(b) CASE2($Re = 12250$)

図-5 v_L の固有ベクトル ϕ_{L1} のせん断変形 γ

z, t の空間分布であり、図-2 に示す瞬間流速ベクトルを分解したものである。 v_L は凹部内での循環流を、 v_c はせん断混合層での組織運動を、そして、 v_s は空間スケールの小さい微小変動をそれぞれ表しており、流速 v が明確に三層分解されているのがわかる。

得られた準平均流成分 v_L と組織乱流成分 v_c に POD を適用し、各階層成分の主要な時空間構造を抽出する。図-4 に、CASE1($Re = 3050$)における v_L の固有ベクトル ϕ_{L1} (モード $m=1$) を示す。 ϕ_{L1} は、平均流速ベクトルとほぼ同一であることから、時間平均的な循環流を表していると考えられる。図-5 は、固有ベクトル ϕ_{L1} によるせん断変形 $\gamma = \partial \phi_{wL1} / \partial x + \partial \phi_{uL1} / \partial z$ の空間分布である。ここで、 (ϕ_{uL1}, ϕ_{wL1}) は、それぞれ ϕ_{L1} の x, z 方向成分である。図-5 において、 γ は主流-凹部境界の流入部で大きく、流下方向に減少する。CASE2($Re = 12250$)における γ は、CASE1($Re = 3050$)に比べて値が小さく、せん断混合層の発達が弱いことが推察される。

図-6 にモード $m=1, 2$ の組織乱流成分 v_c の固有ベクトル ϕ_{cm} を、図-7 に $m=1, 2$ の v_c の振幅 $a_{cm}(t)$ の位相関係 (全計測時間 $T = 8.8\text{sec}$) を示す。図-6 より、 ϕ_{cm} は主流-凹部境界に沿って局所的に大きくなっており、せん断混合層での組織運動の主要パターンが明確に抽出されている。また、図-7 に示す位相関係はほぼ原点を中心とする円形軌道を描いており、モード $m=1, 2$ の v_c の主成分間には、周期的でかなり安定した時間構造が存在することがわかる。また、CASE1($Re = 3050$)の ϕ_{cm} に比べて、CASE2($Re = 12250$)における ϕ_{cm} の空間分布は凹部全体に広がっている。これは、図-5 に示すように、CASE2 ではせん断混合層が縮小し、流入部での流速変動が凹部全域に拡がるためと考えられる。

参考文献 1) 宮本仁志, 神田 徹: 開水路凹部における流れの組織運動の二次元ウェーブレット解析, 水工学論文集, 第45巻, pp.499-504, 2001. 2) 宮本仁志, 神田 徹, 兵頭伸幸: 開水路凹部における乱れの主成分分析, 水工学論文集, 第45巻, pp.505-510, 2001.

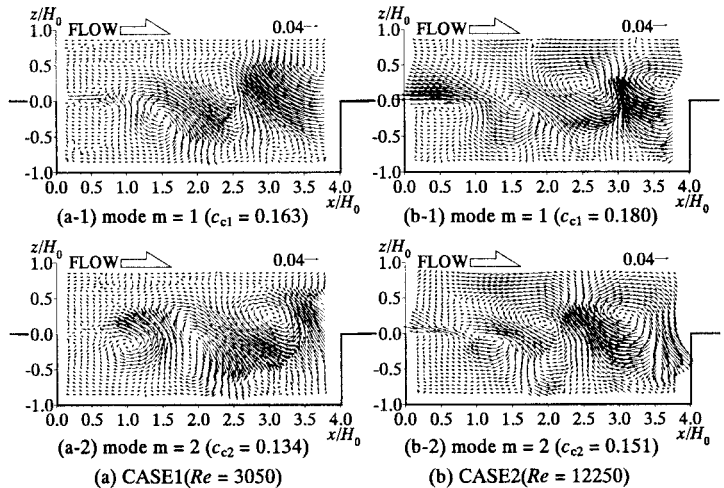


図-6 組織乱流成分 v_c の固有ベクトル ϕ_{cm}
(各図のキャプションに寄与率 c_{cm} を併記)

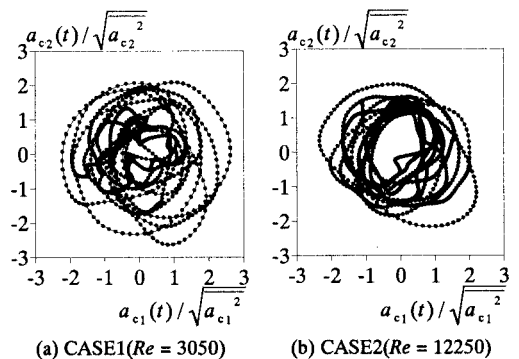


図-7 組織乱流成分 v_c の主成分間の位相関係
(mode $m=1, 2$; 全計測時間 $T = 8.8\text{sec}$)