

フィードバック解析による開水路乱流－水面変動の相互作用の一評価

神戸大学大学院 学生員 ○畑 洋輔

神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志

(株)ニュージェック 正会員 下山 顕治

1. はしがき

自由水面近傍での乱流構造は、水表面を介しての気体輸送や運動量交換に関係するため、水環境の観点からも重要となる。筆者らは、これまで、画像計測により開水路流れにおける瞬時の水面分布と流速ベクトルを同時測定し、水面変動と開水路乱流との相関構造を検討してきた¹⁾。本報では、水面・流速変動の主成分にフィードバック解析²⁾を適用することによって主成分間の因果関係について検討を行った。

2. 実験概要

本報での水理条件を表-1に示す。対象としたのは、筆者ら³⁾による実験のうち最もフルード数 Fr が大きい計測値である ($Fr=2.33$)。画像計測において、計測値のサンプリング周波数(時間分解能)は 400Hz であり、一画素の実長(空間分解能)は約 0.2mm である。

表-1 水理条件

Q (cm ³ /s)	B (cm)	H (cm)	U (cm/s)	U_* (cm/s)	S	Fr	Re
5×10^3	25.0	1.96	102.10	5.17	1/65	2.33	2×10^4

Q : 流量, H : 平均水深, U : 平均流速, U_* : 底面摩擦速度, S : 水路床勾配, Fr : フルード数, Re : レイノルズ数

3. 解析方法

フィードバック解析に用いた多変量自己回帰モデルは次式のようなである。

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) x_j(t-m) + e_i(t) \quad (1)$$

ここに、 $x_i(t)$: 解析対象の時系列, $a_{ij}(m)$: 自己回帰係数, $e_i(t)$: 誤差項, M, N : モデルの次数, である。式(1)により各 POD 主成分の時系列¹⁾をモデル化し、変量間の因果関係を検討する。本報では、水面変動の POD 主成分 Φ_{sm} の時系列 $a_{sm}(t)$ に対しては全変動強度の 90% を再現するモード $Ms=9$ までを、流速変動主成分 Φ_{vm} の時系列には全変動強度の 60% を再現するモード $Mv=14$ までを用い、計 23 変量の自己回帰式によってフィードバック系を表現した。図-1 に水面変動と流速変動の間のフィードバック系を示す。

フィードバック系で時系列間の相互関連の評価には、次式で示すパワー寄与率 r_{ij} を用いる。

$$r_{ij}(f) = q_{ij}(f) / p_{ii}(f) = \left| A(f)^{-1} \right|_{ij}^2 / \sum_{j=1}^N q_{ij}(f) \quad (2)$$

ここに、 $q_{ij}(f)$: 変数 x_j の誤差項の寄与分, $A(f)$: x_i から x_j への周波数応答関数, s_{ij} : $e_j(s)$ の自己共分散関数, $p_{ii}(f)$: 変数 x_i のパワースペクトルである。

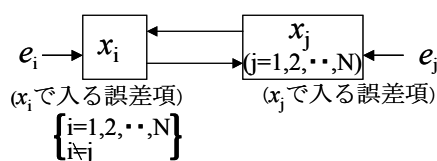


図-1 フィードバック系の概要

4. 結果と考察

測定値に POD 解析¹⁾を施すことによって、水面変動成分 h' の固有ベクトル Φ_{sm} と流速変動成分 $\mathbf{v}' = (u', v')$ の固有ベクトル Φ_{vm} を算出した。図-2 に水面変動成分の固有ベクトル Φ_{sm} (モード $Ms=1, 4, 6, 9$) を示す。 Φ_{sm} は、第一モード($Ms=1$)では流れ場全体で上下変動する成分を示し、モード Ms が高次になるに従って、正弦波分布分布となり、対応する波数も大きくなる。一方、図-3 は流速変動主成分 Φ_{vm} (モード $Mv=1, 4, 6, 10$) である。モード $Mv=1$ での Φ_{v1} は計測断面全体で変動する成分を示し、モード Mv が大きくなるに従いその空間スケールは小さくなり、水平スケールが平均水深 H の 1~2 倍

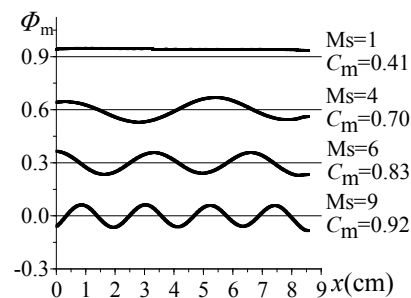


図-2 h' の固有ベクトル Φ_{sm} (比較のため縦軸を調整。 C_m は累積寄与率を示す)

キーワード: 開水路, 乱れ, 水面変動, フィードバック解析

連絡先: 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-881-1212 FAX 078-803-6069

程度の部分的な変動を表すようになる．図-4、-5 は、固有ベクトル Φ_{sm} 、 Φ_{vm} の振幅 $a_{sm}(t)$ 、 $a_{vm}(t)$ のスペクトルである(卓越周期の変化特性をみるため縦軸を調整している)．水面変動主成分 a_{sm} の卓越周期はモード次数とともに高周波になるのに対し，流速変動主成分 a_{vm} の卓越周期は，モード次数が大きくなるとともに高周波になる傾向はあるものの， $Mv=4\sim 14$ では $10\sim 30\text{Hz}$ の間で変動する．

以上のような空間/時間スケールをもつ水面変動主成分と流速変動主成分の時系列 $a_{sm}(t)$ 、 $a_{vm}(t)$ を用いて，主成分間のフィードバック解析を行った．図-6 に，流速変動成分と水面変動成分のパワー寄与率 r_{ij}^v 、 r_{ij}^s を示す．図-6 (a-1)，(b-1)において，流速変動主成分($Mv=1,6$)における水面変動主成分の寄与 r_{ij}^s は，流速変動主成分からの寄与 r_{ij}^v に比べてほとんどない．一方，図-6 (a-2)，(b-2)に示すように，水面変動主成分($Ms=1,6$)における流速変動成分からの寄与 r_{ij}^v は， 10Hz 程度の低周波域において 1 割程度みられる．これに対応する低周波域の流速変動主成分は，図-3、5 より，モードが 4 次以上の水平スケールが $1\sim 2H$ 程度の主成分であると考えられる．これらより，本報で得られた流速変動主成分は水面変動成分からの影響をほとんど受けないのに対して，水面変動主成分は空間スケールが $1\sim 2H$ ，時間スケールが 10Hz 程度の流速変動成分から影響を受けていることが推察される．

<参考文献> 1) 宮本，下山：水工学論文集，第 47 巻，pp.439-444，2003． 2) 和田：生体のゆらぎとリズム，225p，講談社，1999． 3) 宮本，下山，神田，稲岡：第 57 回土木学会年講概要，II-076，2002．

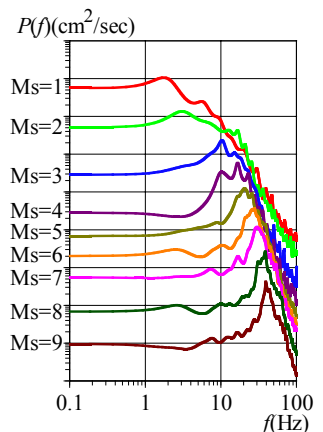


図-4 a_{sm} のパワースペクトル
(比較のため縦軸を調整)

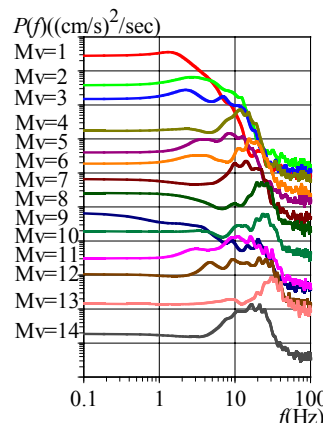


図-5 a_{vm} のパワースペクトル
(比較のため縦軸を調整)

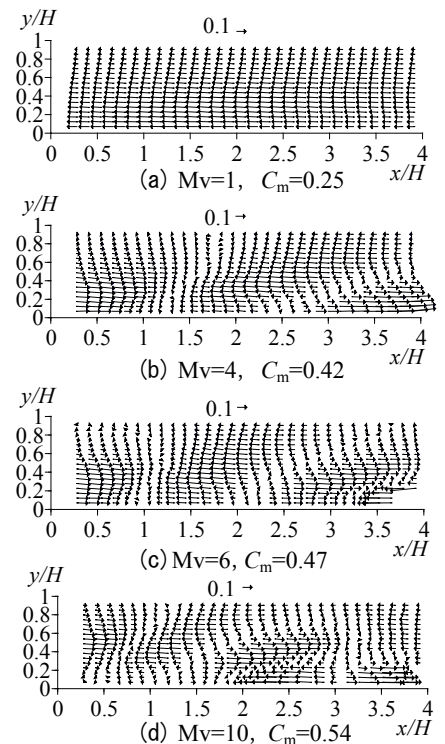
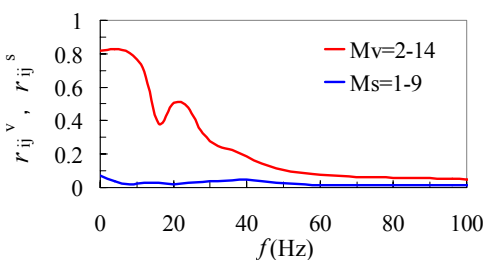
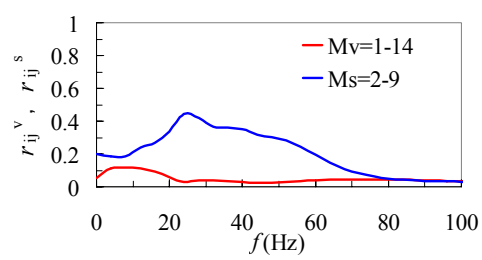


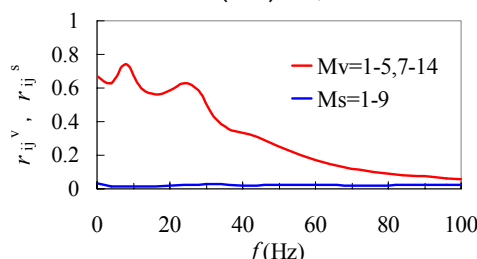
図-3 v の固有ベクトル Φ_{vm}
(C_m は累積寄与率)



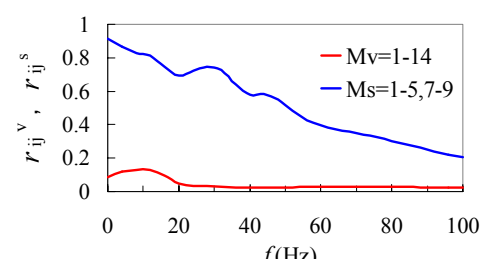
(a-1) $Mv=1$



(a-2) $Ms=1$



(b-1) $Mv=6$



(b-2) $Ms=6$

図-6 パワー寄与率