

開水路流れの水面波紋と乱れの相互作用に関するフィードバック解析

神戸大学大学院 学生員 松村慎太郎
 神戸大学工学部 正会員 宮本 仁志

1. はじめに

自由水表面下での乱流構造は、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、河川の自浄作用など水環境の観点から重要となる。その水 - 空気の界面は付近の乱流の状況に応じて様々な時空間スケールの変動を呈し、内部の乱流構造と相互に影響を及ぼしている。本研究においては、水面・流速の同時画像計測法を用いて測定した時々刻々の水面分布と流速ベクトル¹⁾を対象にフィードバック解析²⁾を行い、開水路流れにおける水面波紋と流れ内部の乱れとの因果関係を検討したので報告する。

2. 水理実験の概要

本研究で対象とする実験の水理条件を表-1 に示す。実験では、レイノルズ数 $Re = \bar{U}H/\nu$ を 2.0×10^4 で一定にし、 $Fr = \bar{U}/(gH)^{1/2}$ を 0.81 ~ 2.33 と変化させている。時々刻々の水深分布と流速ベクトルは水面・流速の同時画像計測法³⁾を用いて計測した。画像計測の測定条件に関しては、水面画像のサンプリング周波数は Case1 で 400Hz、その他の Case で 240Hz である。

3. 解析対象となる計測値

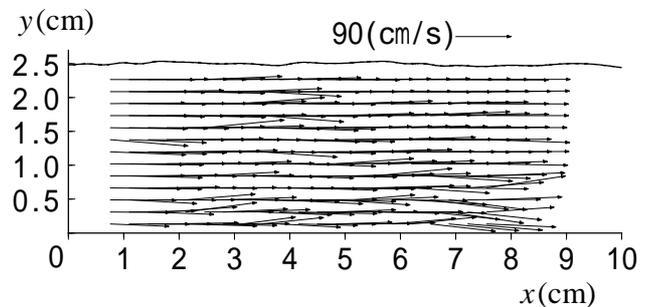
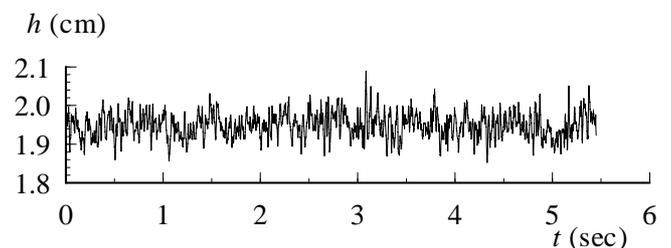
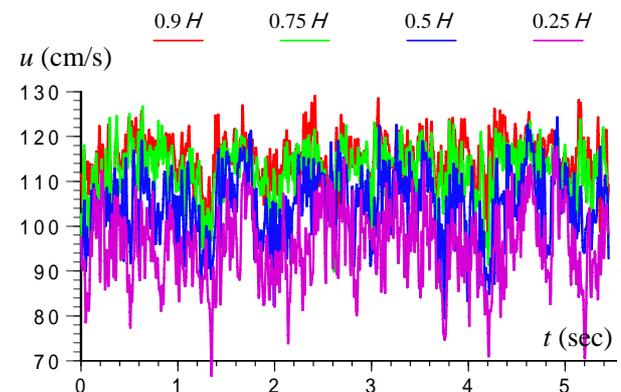
水面・流速の同時画像計測法³⁾により測定された瞬時の水面分布と流速ベクトルを図-1 に示す。水面はほぼ水平であるが、波長が 2 ~ 3cm の微小な凹凸が存在しており、水表面下の流れの乱流構造とこれら水面変動の間には関連性があることが示唆される。

図-2, 3 に、水面変動と内部流速の時系列をそれぞれ示す。図-2 より、水面の時系列は平均水深のまわりを上下に変動しており、変動が種々の時間スケールの成分からなっていることが推察される。一方、図-3 より、流下(x)方向流速 u の時系列に関しても、水面変動と同じように平均流速のまわりを上下に激しく変動しているのがみられ、また、水路底面に近づくにつれて平均流速が小さくなっている。本研究では、図-2, 3 に示すようなさまざまな時間スケールをもって変動している水面変動・流速変動成分の時系列を対象としてフィ-

表-1 水理条件

Case	Q (cm ³ /s)	H (cm)	\bar{U} (cm/s)	U_* (cm/s)	I/I	Fr	Re
1	5.0×10^3	2.0	102.1	5.17	1/65	2.33	2.0×10^4
2		2.5	79.3	4.20	1/134	1.60	
3		3.0	67.1	3.51	1/215	1.24	
4		3.5	56.5	3.01	1/347	0.96	
5		4.0	50.4	2.75	1/476	0.81	

ここに、 Q : 流量、 H : 平均水深、 \bar{U} : 断面平均流速、 U_* : 底面摩擦速度、 I : 水路床勾配、 $Fr = \bar{U}/(gH)^{1/2}$: フルード数、 $Re = \bar{U}H/\nu$: レイノルズ数、 g : 重力加速度。

図-1 瞬時の流速ベクトルと水面分布
(Case 2: $Fr = 1.60$)図-2 水面変動の時系列 (Case1: $Fr = 2.33$, $x = 5.01$ cm)図-3 x 方向流速 u の時系列
(Case1: $Fr = 2.33$, $x = 5.01$ cm)

キーワード 開水路, 乱流, 水面, 水理実験, 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 神戸大学工学部建設学科 e-mail: miyamo@kobe-u.ac.jp

ドバック解析を行い、それらの間にある因果関係を検討した。

4. 解析結果と考察

図-4 に、各 Case の水面変動時系列に対するスペクトル分布を示す。フルード数 Fr が大きくなると、水面変動のスペクトル分布は高周波数側に大きい値を示すようになり、時間スケールの小さい変動成分の割合が相対的に大きくなっていく。また、スペクトルの傾きに関しては、約-2 ~ -2.5 程度のべき乗分布に従っているようであり、フルード数 Fr が大きくなるとともにその傾きは若干大きくなるようである。この結果は、乱れに関する-5/3 乗則よりも若干大きい傾きを示しており、水面変動が開水路内部の乱れとまったく同一の変動特性を示すということではないことを示唆している。

図-5 に本研究のフィードバック解析で採用した計測点位置と略記号を示す。フィードバック解析に用いた計測点は計 12 点であり、計測断面の中央部分において流下方向に 1cm 間隔で 3 断面 ($x=x_0, x_{+1}, x_{-1}$)、鉛直方向には水面変動成分と $y = 0.9H, 0.5H, 0.25H$

における x 方向の流速変動成分を解析に採用している。

図-6 は $x=x_0$ における水面変動成分 $S(x_0)$ が 12 測点のそれぞれからどの程度影響を受けるのかをパワー寄与率 $P(\%)$ で示したものである。ここでは、図-4 に示すスペクトル分布より、その傾きが約-2 ~ -2.5 の一定になる周波数 $f=30\text{Hz}$ とそれよりも低周波側の $f=1.0\text{Hz}$ の結果を示す。図-6(a) に示す周波数 $f=1.0\text{Hz}$ のパワー寄与率の分布より、フルード数 $Fr=2.33$ では上流側 $x=x_{-1}$ の水面変動 $S(x_{-1})$ が $S(x_0)$ に大きく寄与していることがわかる。

Fr 数が小さくなるにしたがい、上流側 $x=x_{-1}$ の流速変動

のパワー寄与率が大きくなり、水面変動 $S(x_{-1})$ の影響は相対的に小さくなる。一方、図-6(b) に示す周波数 $f=30\text{Hz}$ のパワー寄与率の分布においては、フルード数 $Fr=2.33$ では上流側 $x=x_{-1}$ の水面・流速の各変動成分の影響が大きく、 Fr 数が小さくなるにしたがって直下 $x=x_0$ における変動成分の影響が相対的に大きくなっている。

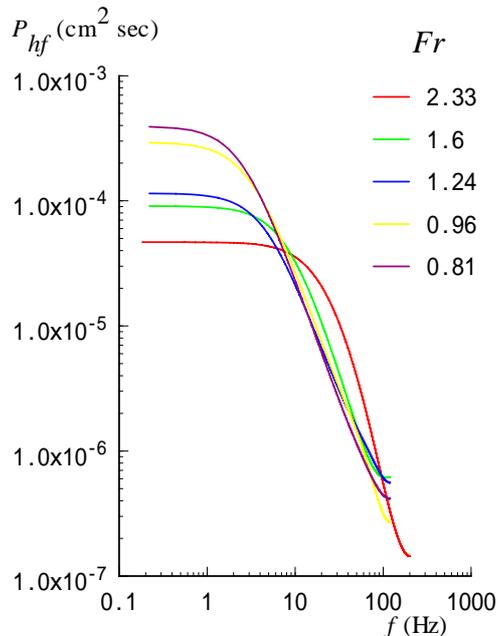


図-4 水面変動時系列のスペクトル分布

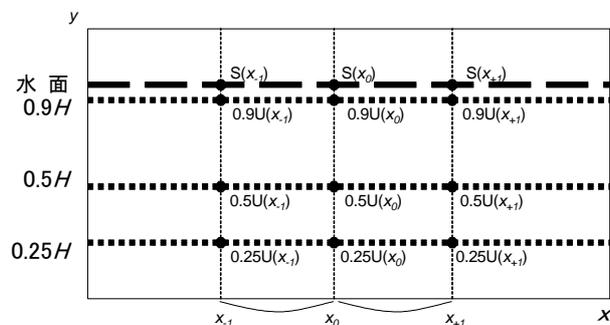


図-5 フィードバック解析の対象計測点位置と略記号

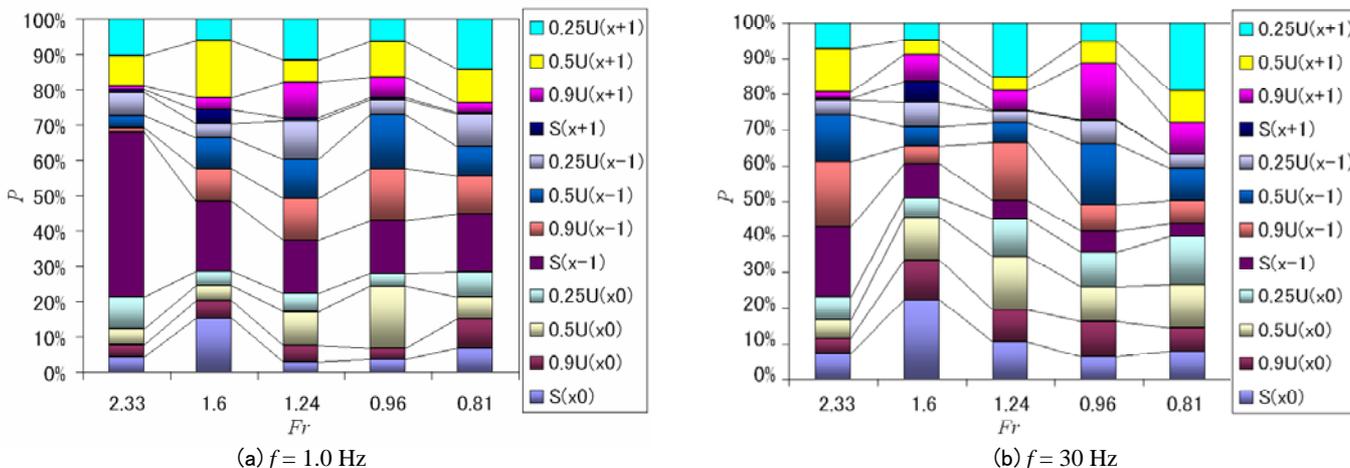


図-6 水面変動に関するパワー寄与率とフルード数の関係

＜参考文献＞ 1)宮本仁志：開水路乱流における水面変動の移流特性，水工学論文集，第50巻，2006．2)赤池弘次，中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，pp.61-72，サイエンス社，1972．3)宮本仁志，神田 徹，大江和正，下山顕治：水面・流速の同時画像計測法の開発と水面変動を伴う開水路凹部流れの解析，土木学会論文集，No.726/ -62，pp.41-53，2003．