

京都大学工学部 正 員 欄津家久
 京都大学大学院 学生員 中山忠暢
 香 川 県 正 員 ○喜多亮史
 京都大学大学院 学生員 伊藤 慎将

1. はじめに 開水路に特有な自由水面は乱れの再配分率の複雑化に大きな影響を及ぼすことが従来より指摘されている。特に $Fr=1$ の限界流近傍では、乱れのinactive成分の卓越によって流れが波状特性を示し不安定になる。また、 Fr 数の増加とともに水面変動は増加し、乱れ特性や逸散率等に大きな影響を及ぼすとともに、水面が穏やかであることを前提とするHuntの理論¹⁾は成立しなくなる。本研究では2台のレーザ流速計および超音波波高計の同時計測を行うことによって、このような自由水面近傍の乱流構造と水面変動の関連性についての考察を行う。

2. 実験方法および水理条件 本実験で使用した水路は長さ10m、幅40cm、高さ40cmの可変勾配型循環式水路である。2台の4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザ流速計(Dantec社製)を用いて滑面流れに対して水路側壁と底面下方より水路中央断面における三次元乱流計測を行うとともに、水路上方には水面に非接触型の超音波波高計(Keyence社製)を設置し、レーザ流速計と同期するようにした。表-1に水理条件を示す。

表-1 水理条件

case	S	h (cm)	B/h	U _m (cm/s)	U ₊ (cm/s)	Fr	Re (x10 ³)
L-FR01	1/25000	8.0	5.0	10.0	0.59	0.12	8.0
L-FR02	1/6000	5.0	8.0	16.0	0.99	0.23	8.0
L-FR03	1/3000	4.0	10.0	20.0	1.14	0.32	8.0
L-FR04	1/2000	3.5	11.4	22.9	1.33	0.39	8.0
L-FR05	1/1500	3.0	13.3	28.7	1.49	0.49	8.0
M-FR06	1/1200	5.0	8.0	40.0	2.10	0.67	20.0
M-FR07	1/900	4.5	8.9	44.4	2.32	0.67	20.0
M-FR08	1/800	4.0	10.0	50.0	2.50	0.80	20.0
M-FR09	1/455	3.7	10.8	54.1	2.78	0.90	20.0
M-FR10	1/316	3.2	11.4	57.1	2.90	0.98	20.0
M-FR11	1/273	3.2	12.5	62.5	3.22	1.12	20.0
M-FR12	1/250	3.0	13.3	66.7	3.36	1.23	20.0
H-FR13	1/500	5.0	8.0	75.0	3.80	1.07	37.5
H-FR14	1/240	4.5	8.9	83.3	4.00	1.25	37.5
H-FR15	1/167	4.0	10.0	93.8	4.75	1.50	37.5
H-FR16	1/111	3.5	11.4	107.1	5.42	1.83	37.5
H-FR23	1/77	3.0	13.3	125.0	6.09	2.30	37.5

3. 実験結果および考察 水面変動のほとんどない Fr 数の小さい流れにおいては、自由水面の低減特性によって鉛直方向の乱れ強度 v は管路に比べて大きく低減する。このことは開水路における乱れエネルギーが流速変動の鉛直方向成分から主流方向および横断方向へ再配分されることを示しており、

管路との大きな相違を生み出す原因となる²⁾。このような自由水面近傍の乱流構造は、水面変動の有無によってさらに複雑化することになる。図-1はケースM, Hについての瞬間水面変動の時系列である。これより、限界流近傍で変動の振幅が最大になるとともに低周波成分が卓越し、以下に述べる乱れ特性の高揚現象と大きな関連がある。図-2はケースL, M, Hについての Fr 数に対する、平均主流速 U のwakeパラメータ Π の変化特性であ

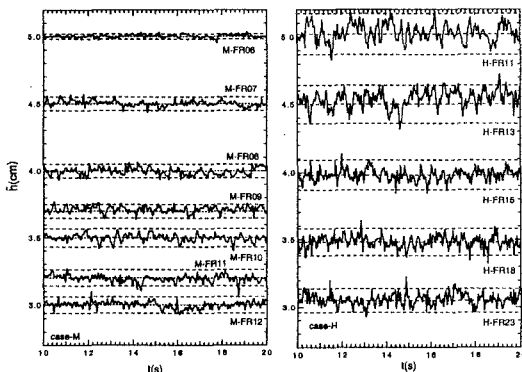


図-1 瞬間流速変動の時系列

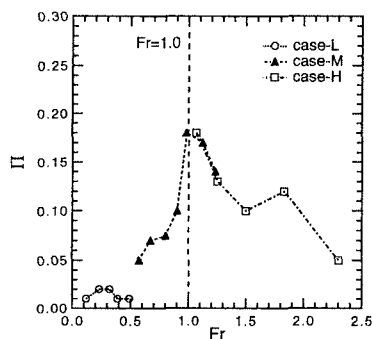
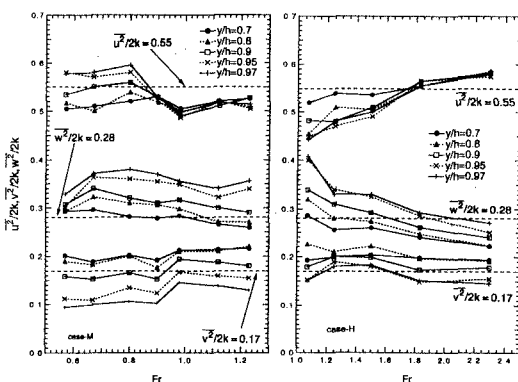
図-2 wakeパラメータ Π の変化特性

図-3 乱れ再配分率の変化特性

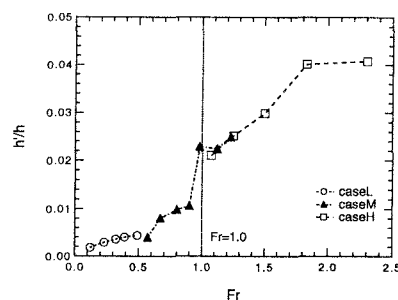


図-4 相対水面変動強度の変化特性

る。従来よりこの Π は Re 数に依存することが指摘されているが、この図より Fr 数にも大きく依存し、特に限界流近傍において急増して対数則からのずれが大きくなることがわかる。このことは U もまたinactive成分に大きく左右され、水面近傍での不安定性の影響を受けることを示している。

図-3はケースM, Hについて、相似則からのずれが大きくなる自由水面近傍での乱れ再配分率の Fr 数に対する変化特性である。これより特に、鉛直方向成分は限界流近傍で急増し、射流になると再び緩やかに減少していく特性が見られる。図-4は相対水面変動強度 h'/h の Fr 数に対する変化特性である。これより Re 数の影響も若干存在するが限界流

近傍で値が急増しており、水面変動のinactive成分との関連性によって高揚現象に大きな影響が及ぼされると考えられる。また、このような相対水面変動強度の高揚現象は v' の急増領域に対応しており、 h' と v' には密接な相関関係があると考えられ、周波数スペクトルにも同様な特性が見られた。

図-5はケースHについての自由水面近傍における ε と G の変化特性であり、図には半径経験式も併示した。これより、 G は Fr 数にほとんど無関係でself-consistentな特性が顕著に現れているが、 ε は Fr 数の増加に比例して増えていく特性が見られる。図-6は水面近傍($y/h=0.8, 0.9, 0.95$)での ε に対する相対水面変動強度の2乗の変化特性である。これより、水面変動の大きい流れでは ε と $(h'/h)^2$ にほぼ線形的な関係が見られ、水面変動による波のエネルギーが大きいほど水面近傍において失われるエネルギーが大きくなる。また、この特性は限界流近傍においても成立しており、水面変動とエネルギー逸散の関係において乱れのinactive成分はそれほど大きな影響を及ぼさないといえる。

一方、Hunt & Graham (1978)¹⁾は、水面の穏やかな Fr 数の小さい流れについて、自由水面の低減効果を考慮して v' と ε を現象学的に関連づけた。

$$v'/U_* = 1.34(\varepsilon h/U_*^3)^{1/3}(1-y/h)^{1/3} \quad (1)$$

図-7はケースL, M, Hについて、実測の ε を式(1)に適用して求めた v' と実験値の v' を比較したものである。これより、水面変動のないケースLでは $y/h > 0.9$ における自由水面の低減効果を良く表しているが、 $y/h < 0.9$ では過大評価となることがわかる。このことはHuntの理論では自由水面近傍の比較的小規模の渦のみが v' に関与すると考えているためである。水面変動の生じるケースM, Hでは $y/h > 0.9$ で大きく上にそれて過小評価することになり、Huntの理論に水面変動強度等の影響を考慮した修正が必要なることを示している。

4. おわりに 本研究では、開水路に特有な自由水面近傍の低減特性を考察するとともに、水面変動が乱流構造に及ぼす影響について検討を行った。特に、限界流近傍ではinactive成分の卓越によって流速変動および水面変動の乱れ特性に高揚現象が見られた。また、水面変動エネルギーと逸散率の関係についても考察を行った。

<参考文献>

- 1) Hunt, J. C. R. & Graham, J. M. R. : J. Fluid Mech., vol.84, pp.209-235, 1978.
- 2) Nezu, I. & Nakagawa, H. : Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.