

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

1. はじめに 自由水面を有する開水路流れにおいて、水面の比較的穏やかな常流、流れが波状跳水的特性を示し不安定になる限界流、水面変動がかなり激しくエネルギー逸散の大きい射流、の3種類の流れでは乱れ構造やエネルギー収支関係に大きな変化が見られる。本研究では2台のレーザ流速計および超音波波高計を用いてマクロスケールの評価および時空間相関解析を行うことによって、このような自由水面近傍の組織構造と乱れの低減特性との関連性、および水面変動の関連性について総合的考察を行う。

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の変勾配型循環式水路である。滑面流れに対して、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)を水路側壁から用いて同時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 (×10 ³)
M-FR06	1/1200	5.0	8.0	40.0	2.10	0.57	20.0
M-FR07	1/800	4.5	8.9	44.4	2.32	0.67	20.0
M-FR08	1/600	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	3.5	11.4	57.1	2.90	0.98	20.0
M-FR11	1/273	3.2	12.5	62.5	3.24	1.12	20.0
M-FR12	1/250	3.0	13.3	66.7	3.36	1.23	20.0
H-FR11	1/300	5.0	8.0	75.0	3.80	1.07	37.5
H-FR13	1/244	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-FR18	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
S-FR31	1/41	3.0	13.3	166.7	8.47	3.07	50.0

3. 実験結果および考察 水面変動と流速変動の乱れ特性、および周波数特性の評価より、水面近傍における流速変動と水面変動には密接な関係があると考えられる。図-1はケースM, Hの水面近傍(y/h=0.95)における相互相関係数 $C_{uh}(\tau)$ の遅れ時間に対する変化特性であり、Fr数に無関係に $\tau=0(s)$ で負のピーク値をとっている。また、図-2は $C_{vh}(\tau)$ の遅れ時間に対する変化特性であり、限界流から離れた流れにおいては一般に $\tau=0(s)$ 近傍で正のピーク値をとるのに対して、限界流に近づくにつれて位相のずれが大きくなっていく特性が見られる。これらより、限界流から離れた安定した流れにおいては、水面近傍における瞬間的な加速流れが下降するときに水面は低下し、瞬間的な減速流れが上昇するときに水面は上昇することになる。しかし、限界流近傍においては位相のずれが不安定な波状跳水的流れを生み出し、乱れ特性、および水面変動に急激な高揚現象をもたらすと考えられる。

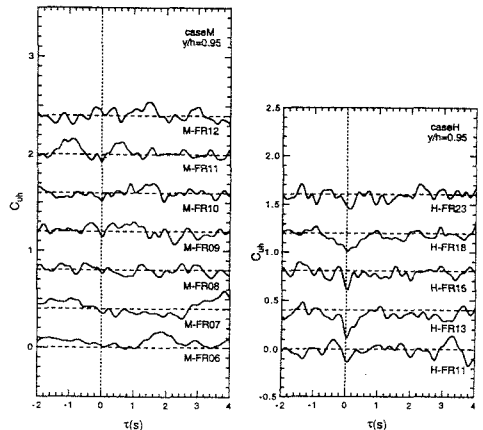


図-1 相互相関係数 C_{uh} の分布

このような自由水面近傍の乱流構造は組織構造と密接な関係があるとともに、自由水面の低減特性は非均一場である鉛直方向のマクロスケール等の変化とも密接に関連している。また、壁面近傍で発生するbursting現象は表面更新渦と関連していることも指摘されている。図-3は鉛直方向のマクロスケールの変化特性であり、水面が穏やかな流れに対して適用可能なHuntのモデル¹⁾と良く一致するHandler et al. (1993)²⁾の数値計算値も併示した。これより、 L_{uy} , L_{vy} は $y/h > 0.6$ で減少し自由水面の低減効果によって長さスケールが減少することになる。また、 L_{uy} は計算値と類似しているのに対して、 L_{vy} は計算値よりもかなり小さく、自由水面の存在による流速変動成分間での非等方性の影響が大きく現れている。特に $y/h > 0.9$ における L_{uy} については、水面の穏やかな常流では特性が類似しており、乱れ特性と同様にHuntの理論が比較的妥当である。しかし、水面変動の生じるケースM-FR10, S-FR31ではピーク位置が水面側に移行して分布がなだらかになっており、この特性は限界流の

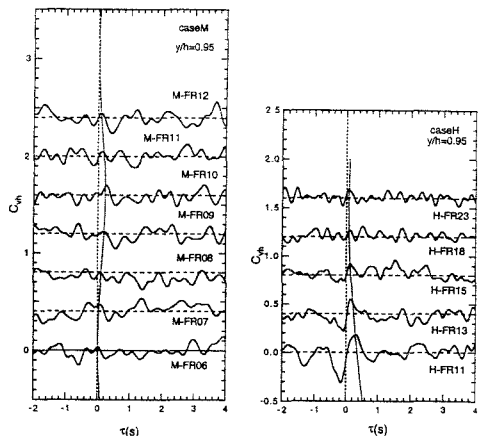


図-2 相互相関係数 C_{vh} の分布

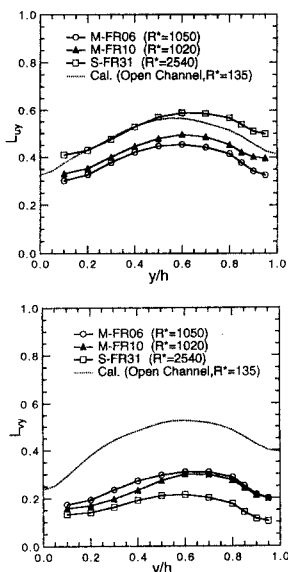


図-3 鉛直方向のマクロスケールの変化特性

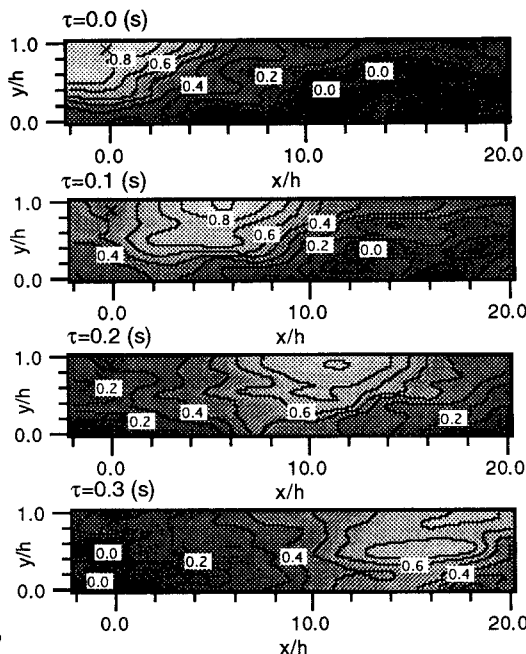


図-4 条件付き時空間相関係数<u>

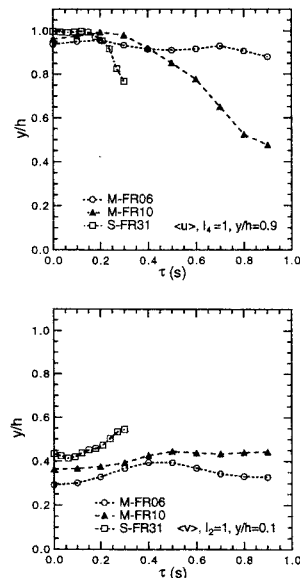


図-5 ピーク値の移流過程

方が顕著である。これより、水面変動の大きい流れにおいてはHuntの理論は成立せず、自由水面の変動は水面近傍における鉛直方向のマクロスケールを増加させるといえる。

図-4は、瞬間流速変動 $u-v$ について四象限区分法を用いて第4象限($u>0, v<0$)のみを抽出した場合における、ケースS-FR31の条件付き時空間相関係数 $\langle u \rangle$ の遅れ時間 $\tau(s)$ に対する変化特性である。ここで、しきい値としてはReynolds応力に対する半値しきい値を用い、値は任意点の乱れ強度で無次元化した。固定点は自由水面近傍($y/h=0.9$)であり、 $\times$ 印で示す。これより、比較的高速な流体が水面下に降下していく特性が見られ、自由水面近傍の組織渦によるものと考えられる。図-5は壁面近傍における第2象限($u<0, v>0$)、および自由水面近傍における第4象限を抽出した場合の $\langle v \rangle$ および $\langle u \rangle$ のピーク値の鉛直方向への移流過程を示したものである。壁面近傍ではFr数の増加とともに高相関領域の上昇速度が大きくなっていき、自由水面近傍では下降速度が大きくなっていく特性が見られる。これより、bursting現象と表面更新渦には密接な関係があり自由水面近傍での組織構造に大きな影響を及ぼすとともに、乱れ特性、乱れ再配分率や水面変動の変化特性とも大きく関連し、水・空気相互作用による物質輸送に大きな影響を及ぼすと考えられる。最後に、以上述べたことを考慮した自由水面近傍の組織渦の物理モデルを図-6に示す。

4. おわりに 本研究は、マクロスケールという代表スケールと自由水面の低減効果との関連性、および自由水面近傍で発生する組織渦と壁面近傍で発生するbursting現象との関連性について、水面変動をも考慮して総合的評価を行ったものである。

<参考文献>

- 1) Hunt, J. C. R. : Gas Transfer at Water Surfaces, vol.84, pp.67-82, 1984.
- 2) Handler, R. A., Swean, T. F., Jr., Leighton, R. I. & Swearingen, J. D. : J. AIAA, vol.31, pp.1998-2007, 1993.

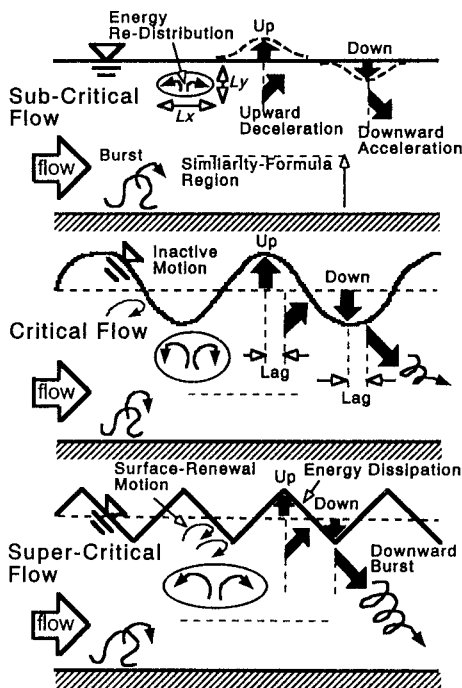


図-6 自由水面近傍の組織渦の物理モデル