

水生植物を伴う流れの三次元構造について

THREE-DIMENSIONAL FLOW STRUCTURE IN OPEN CHANNEL WITH VEGETATION ZONE

大本照憲¹・福井洋幸²・林 俊一郎³

Terunori OHMOTO, Hiroyuki FUKUI, Shunichirou HAYASHI

¹正会員 工博 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)

²学生員 熊本大学大学院工学研究科 土木環境工学専攻 (同上)

³正会員 熊本県八代土木事務所

Laboratory experiments were conducted using two-component electromagnetic velocimeter to clarify the interaction between main flow and flexible artificial vegetation zone, which was attached to the central bottom and side wall of an open channel.

Experimental results showed that in the main flow region under equilibrium horizontal components of secondary currents pointed in the direction toward the vegetation zone near the bottom, and in vegetation zone vertical components directed the upward. Furthermore horizontal waving of vegetation zone activated the momentum transport from main flow region to vegetation zone.

Key Words : vegetation, secondary currents, large scale eddy, waving of vegetation

1. はじめに

植生帯を伴う河川乱流においては、植生境界付近で変曲点不安定に起因する大規模渦が発生し、流れの抵抗や運動量・物質の輸送に多大な影響を及ぼす事が多くの研究により指摘されている¹⁻⁵⁾。しかし、植生帯周辺における二次流構造については不明な点があり、植生帯の平衡領域では平面二次元流れとして扱う場合が多い。本研究は、水生植物と流れとの相互作用によって生ずる流れの三次流構造を明らかにするために、植生帯上に越流が有る場合と無い場合の条件下で、河道中央および側岸に配置した水生植物に伴って生じる二次流構造および乱れ特性について実験により検討したものである。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示す長さ10m、幅40cm、高さ20cmの亚克力樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。植生帯の模型には5cm×300cm×0.3cmのプラスチック板に5mm間隔で模擬植生を張り

付け、水路中央と水路右岸に設置した。模擬植生にはナイロン糸を用い、その特性値は高さ5.5cm、直径0.242mm、曲げ剛性 $EI = 1.45 \times 10^{-4} \text{ gr/cm}^2$ であり、流れに対して柔軟に変形する。流速の測定には二成分電磁流速計を用いた。出力信号は、サンプリング周波数50HzでAD変換した後、1測点2048個のデータに関して統計処理が施された。計測は、表-1に示すように、植生帯を水路中央と右岸に設置した場合のそれぞれに対して植生帯上に越流が有る場合と無い場合の計4種類の条件で行った。なお座標系は、植生帯の上流端の中央に原点をとり、流下方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直上方にz軸を取る。

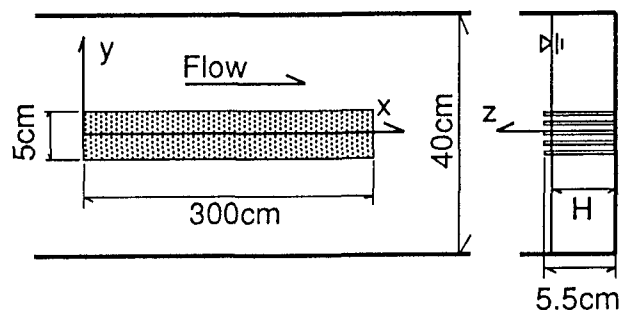


図-1 実験水路の概要

表－１ 実験条件

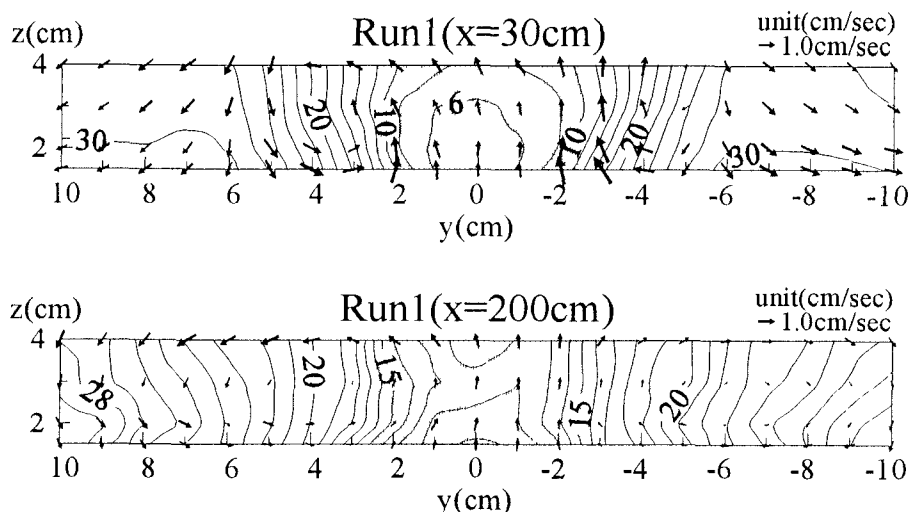
		Run1	Run2	Run3	Run4
流量	Q(l/sec)	6.23	9.93	6.23	9.93
水深	H(cm)	5.4	8.6	5.4	8.6
平均流速	U^m (cm/sec)	27.84	28.85	27.84	28.85
水路勾配	I_0	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
植生位置		中央	中央	右岸	右岸

３．平均流特性

水路中央に設置した植生帯上に越流が無い Run1 と越流が有る Run2 における主流速の等値線および二次流ベクトルをそれぞれ図－２および図－３に示す。なお、図中の黒くハッチングが施されている部分は植生帯を示す。図－２の非平衡領域と見なされる $x=30\text{cm}$ 地点における主流速の等値線から、植生帯内では周辺部に比べて主流速が急激に減衰し、植生帯境界付近の $2\text{cm} \leq |y| \leq 5\text{cm}$ の領域では水面付近に比べて底面付近の主流速が若干大きくなり、主流速は鉛直方向に一樣でないことがわかる。二次流ベクトルを見れば、植生帯内で上昇流、 $y=\pm 5\text{cm}$ 付近で下降流が現れている。この下降流は底面付近において植生帯から離れる二次流成分と、植生域へ向かいローラー状の循環流を形成する二次流成分とにわかれている。この後者のローラー状の二次流により植生帯周辺の高速流体が底面付近から植生帯内に流れ込み、その結果として水面付近に比べて底面付近の方で主流速が大きくなる現象が生じていると考えられる。主流速が流下方向に変化しない平衡領

域の $x=200\text{cm}$ 地点では植生帯内と周辺部との流速差が緩和し、主流速の横断方向変化が小さくなっている。さらに高速流体の潜り込みが、植生帯より離れた $5\text{cm} \leq |y| \leq 10\text{cm}$ の広範囲で生じている。同地点には底面付近に非植生域から植生域へ向かう二次流が $x=30\text{cm}$ 地点に較べて小さくはあるが広い範囲で生じている。この二次流は植生帯内に流入後、上昇流となり、水面付近から非植生域へ向け緩やかに流出している。 $x=30\text{cm}$ 地点の植生帯境界面付近と同じく、これらローラー状の二次流により、植生周辺の主流速分布は特徴付けられていると指摘できる。次に、図－３から Run2 の植生帯上に越流が有る非平衡領域の $x=30\text{cm}$ 地点では、植生高さ以下の植生境界付近において主流速および二次流ベクトルはともに Run1 の $x=30\text{cm}$ 地点と類似の傾向を示している。一方、植生帯上層の越流領域において主流速は植生帯の粗度効果によって $|y| \leq 4\text{cm}$ の範囲で減衰しているが、 $4\text{cm} \leq |y| \leq 10\text{cm}$ の範囲で横断方向に一樣化していることが分かる。二次流は、植生帯上では、植生帯から離れる方向に向きを取り、 $y=\pm 5\text{cm}$ 付近では Run1 と同様に強い下降流が観察される。平衡領域の $x=200\text{cm}$ 地点になると、主流速は $x=30\text{cm}$ 地点に較べ植生帯高さ付近で鉛直方向の急激な変化が緩和されている。また Run1 のローラー状の二次流が強まった形で現れ、底面付近での植生帯内への強い流入および植生帯上方への流出傾向を示している。この二次流パターンから明らかなように非植生域からの高速流体の潜り込みにより、植生帯周辺の底面付近で主流速が大きくなっている。

水路右岸に設置した植生帯上に越流が無い Run3 と越流が有る Run4 における主流速の等値線および二次流ベクトルをそれぞれ図－４および図－５に示す。



図－２ 主流速の等値線および二次流ベクトル
(中央設置、越流無し)

図-4の非平衡領域に当たる $x = 30\text{cm}$ 地点における主流速の等値線から、主流速は植生帯内では鉛直方向に一様化しており、植生帯外では鉛直方向には水面に近づくに従って減少している。同地点における二次流ベクトルを見れば、Run1の植生帯境界面で見られたローラー状の二次流は確認されず、植生帯から境界面を通して流出現象が観察され、非平衡領域特有の流出現象が現れている。平衡領域の $x = 200\text{cm}$ 地点において主流速は $x = 30\text{cm}$ 地点と同様に植生帯内では一様化しており、植生帯外では水面付近での流速の低減が見られる。二次流は全般的にRun1およびRun2に比べて弱く、Run1の $x = 200\text{cm}$ 地点の底面付近で見られた非植生域から植生域へ向かう二次流成分、植生帯内での上昇流、植生帯外での下降流が僅かに生じており、この結果、植生帯周辺部では底面付近に比べて水面付近で主流速が小さ

くなっている。

図-5から植生帯上に越流が有るRun4においては、非平衡領域に当たる $x = 30\text{cm}$ 地点で主流速の等値線および二次流ベクトルは、水路中央に植生帯のあるRun2の $x = 30\text{cm}$ 地点とほぼ類似の傾向を示している。ただし、植生帯からかなり離れた $7\text{cm} \leq y \leq 10\text{cm}$ の水面付近においても植生帯から流出した二次流成分が見られ、側壁に近い $y = -2\text{cm}$ 付近では壁面摩擦効果により主流速は低減し、二次流も弱いことが異なる。平衡領域の $x = 200\text{cm}$ 地点では、主流速の等値線は植生帯の角部に当たる $y = 2.5\text{cm}$ 、 $z = 5.5\text{cm}$ 付近から斜め上方に突出する分布形状を持ち、植生帯内でもそれに対応した形をしていることが分かる。植生帯外での主流速の鉛直分布は、植生帯が水路中央にあるRun2に比べてかなり一様である。二次流は主流速の等値線に良く対応しており、植生

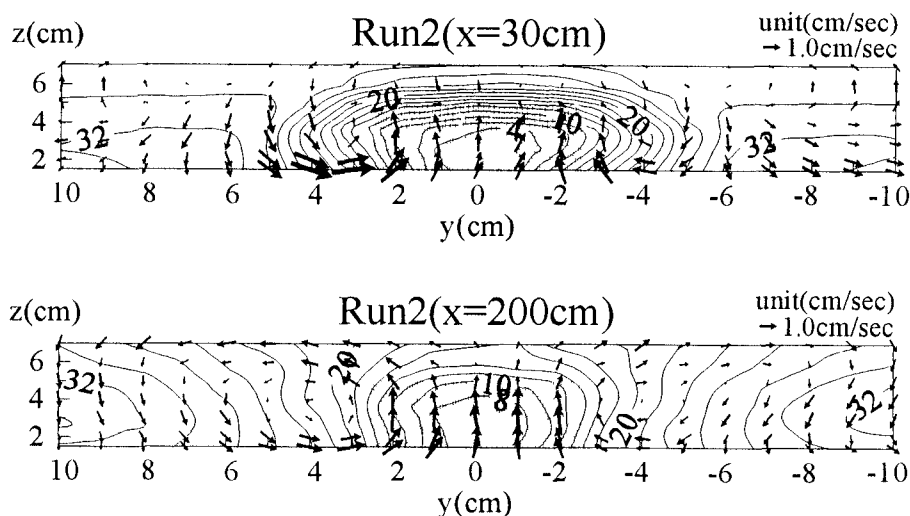


図-3 主流速の等値線および二次流ベクトル
(中央設置、越流有り)

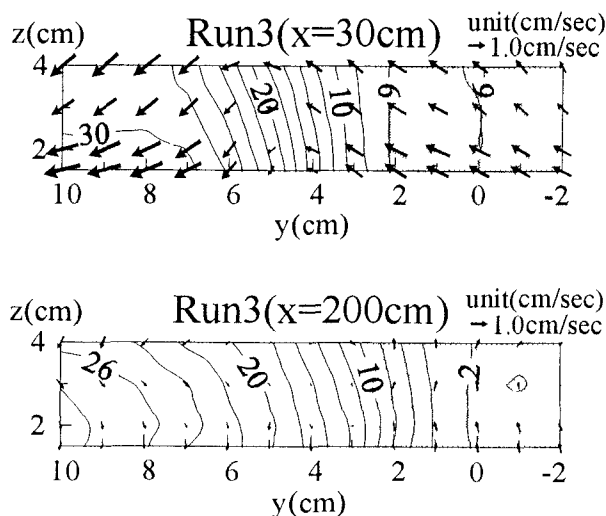


図-4 主流速の等値線および二次流ベクトル
(右岸設置、越流無し)

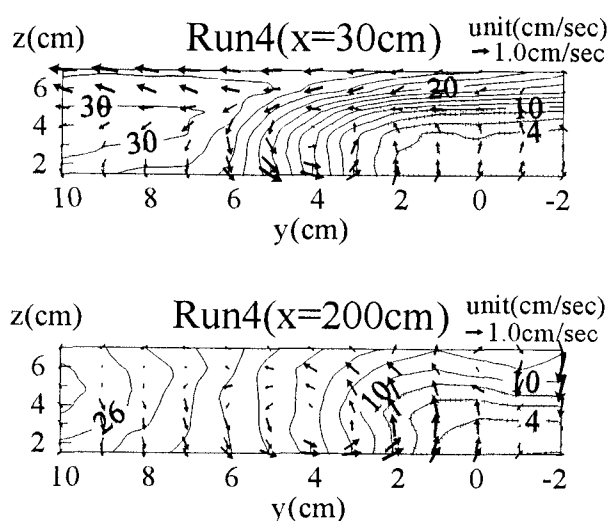


図-5 主流速の等値線および二次流ベクトル
(右岸設置、越流有り)

帯付近では複断面水路に見られる斜昇流^{6,7)}と類似の
パターンを示し、植生帯上の越流域に1個の循環セ
ルが見出され、植生帯内では $y=2\text{cm}$ の境界付近で
明瞭な上昇流が存在し、コーナ付近では主流速が小
さく第二種二次流は小さい。また図-3における
Run2の $x=200\text{cm}$ 地点と比較すれば、水面付近の植
生域から非植生域に向かう二次流の水平成分が $7 \leq$
 $y \leq 10$ の範囲の下降流が弱くなっており、このため
に植生帯周辺において水面付近と底面付近での主流
速の逆転現象が顕著に生じていない。

4. 乱れ特性

乱れ特性に関しては、二次流および植生の揺動
の影響が強く現れることが予想される、Run1およ
びRun2のケースについて考察する。図-6と図-7
は、それぞれRun1とRun2の乱れエネルギーの横

断分布を示す。植生帯上の越流の有無に関わらず、
乱れエネルギーは植生帯高さ以下では $3\text{cm} \leq |y| \leq 4\text{cm}$ の植生帯付近で極大値、植生帯中央で極小値
を示し、平衡領域の $x=200\text{cm}$ における非植生域の植
生帯境界面付近では、底面付近に比べて水面付近の
方で大きい値を示す。植生帯上に越流が有るRun2に
おいては、植生帯上層で乱れエネルギーは均一化す
る。乱れエネルギーは、Run1およびRun2ともに非
平衡領域の $x=30\text{cm}$ に比べて平衡領域の $x=200\text{cm}$ で
大きい。また、Run1とRun2との比較では、乱れエ
ネルギーは全般的に非平衡領域の $x=30\text{cm}$ では同一
の河床高さにおいて植生帯上に流れのあるRun2の方
で大きい、平衡領域の $x=200\text{cm}$ では逆にRun1の
方で大きいことが分かる。

図-8および図-9は、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横
断分布を示したものである。植生帯上の越流の有無
に関わらず、横断方向の流速変動による運動量輸送

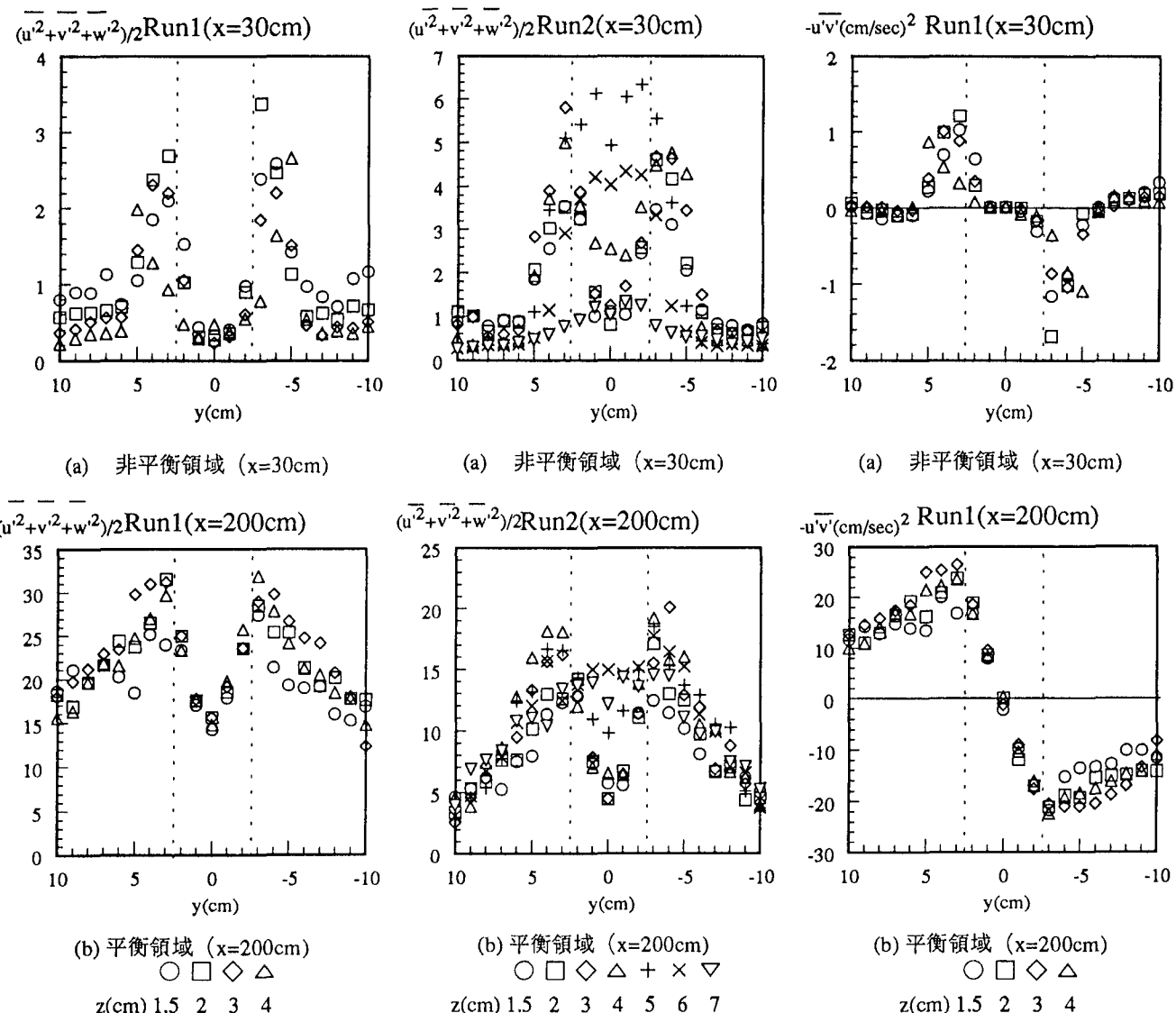


図-6 乱れエネルギーの横断方向分布
(中央設置、越流無し)

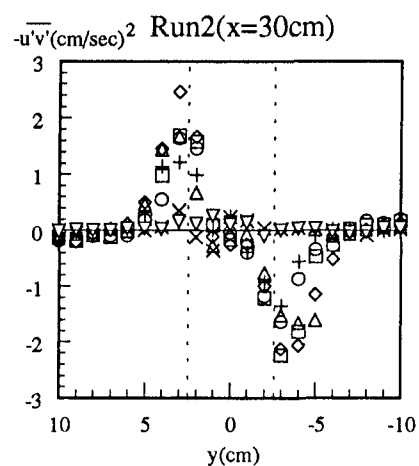
図-7 乱れエネルギーの横断方向分布
(中央設置、越流有り)

図-8 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布
(中央設置、越流無し)

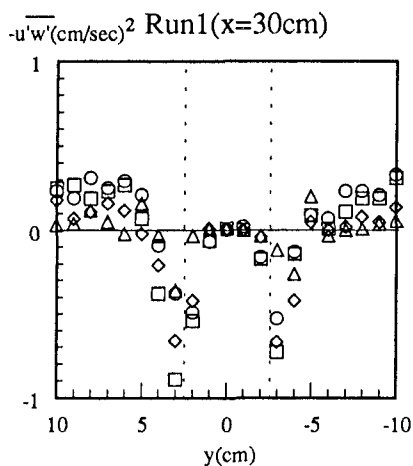
は植生帯境界面付近の $|y|=3\text{cm}$ で極大値を取り、平衡領域の植生帯内での横断方向への運動量輸送は無視できない程に大きく、全般的に非平衡領域に比べて平衡領域の方で大きな値を示すことが分かる。Run1とRun2との比較では、レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ は、非平衡領域の $x=30\text{cm}$ では、Run2の方で大きく、平衡領域の $x=200\text{cm}$ ではRun1の方で大きいことから、乱れエネルギーの大小関係と一致している。

図-10および図-11は、それぞれRun1およびRun2のレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の横断分布を示したものである。図-10から、Run1においてレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ は $x=30\text{cm}$ の植生帯境界付近で負の極大値を示している。これは、図-2から分かるように水面付近において植生帯からの流出に伴う二次流により主流速が低減したためである。また、平衡領域においてレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ は植生帯境界面で極大値を示し、鉛直方向の運動量輸送の向きは非平衡領

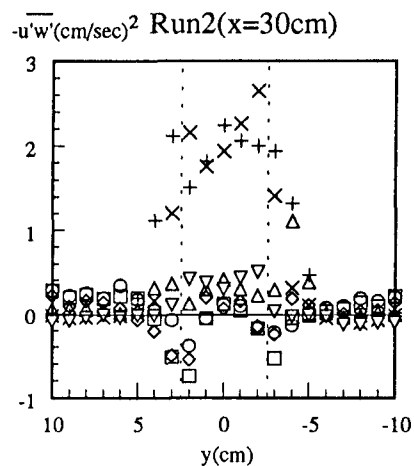
域と平衡領域で逆であり、その量は平衡領域で大きいことが分かる。図-11からRun2においてはレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ は植生帯高さ以下ではRun1と比べて全般的に小さく、植生帯上層ではその直上の $z=6\text{cm}$ 付近で大きいことが分かる。植生帯上の越流の有無に関わらず、レイノルズ応力の大きさは非平衡および平衡領域の何れにおいても $-\overline{u'w'}$ に比べて $-\overline{u'v'}$ の方で大きくなることから、乱れエネルギーの生成には $-\overline{u'v'}$ の寄与が大きい。このため、Run1とRun2のそれぞれに対して、平衡領域の $y=3\text{cm}$ 、 $z=4\text{cm}$ 地点において主流速変動と横断流速変動の時系列を示したのが図-12および図-13である。目視観察により、植生帯の規則的横断方向の揺動はRun1では明瞭に観察されたが、Run2では見出されなかった。そのため、Run2に比べてRun1では流速変動 u' および v' が大きな値を示し、 u' と v' の相関に逆位相の関係を持つことが見出される。またRun1で流速変動 u' およ



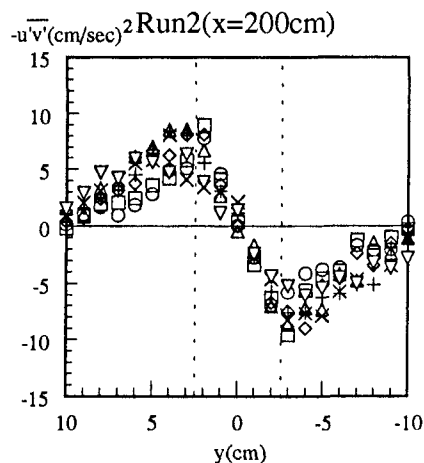
(a) 非平衡領域 ($x=30\text{cm}$)



(a) 非平衡領域 ($x=30\text{cm}$)

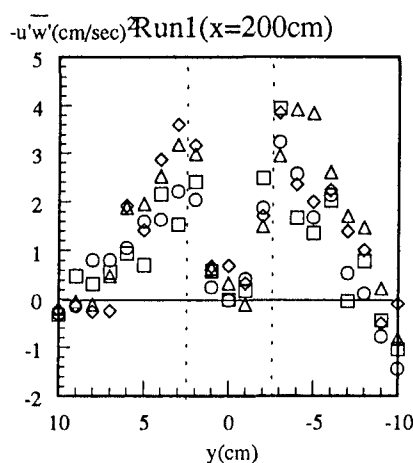


(a) 非平衡領域 ($x=30\text{cm}$)



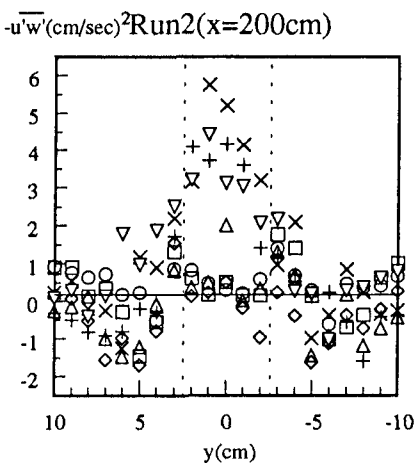
(b) 平衡領域 ($x=200\text{cm}$)

○ □ ◇ △ + × ▽
z(cm) 1.5 2 3 4 5 6 7



(b) 平衡領域 ($x=200\text{cm}$)

○ □ ◇ △
z(cm) 1.5 2 3 4



(b) 平衡領域 ($x=200\text{cm}$)

○ □ ◇ △ + × ▽
z(cm) 1.5 2 3 4 5 6 7

図-9 レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ の横断分布
(中央設置、越流有り)

図-10 レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の横断分布
(中央設置、越流無し)

図-11 レイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の横断分布
(中央設置、越流無し)

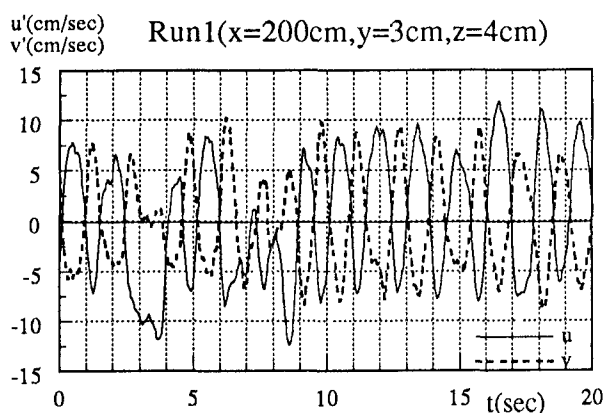


図-10 流速変動の時系列
(中央設置、越流無し)

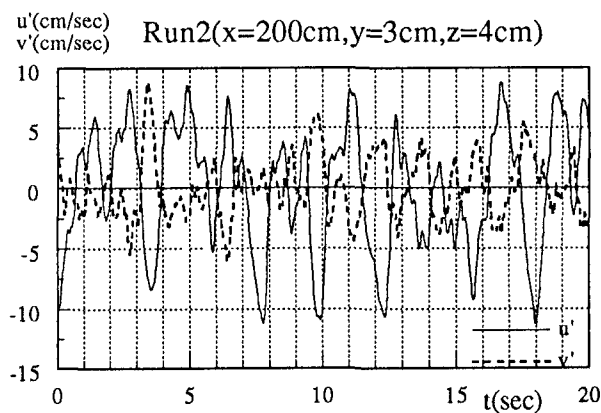


図-11 流速変動の時系列
(中央設置、越流有り)

び v' が周期的であるのは植生の揺動によるものであり、両者の周期はほぼ一致していることがビデオ解析により認められた。

5. おわりに

本研究により得られた主な知見を列挙すると次の通りである。

- (1)水路中央に設置された植生帯上に越流が無い場合、平衡領域における二次流ベクトルから、流体塊は底面付近では非植生域から植生域に流入し、水面付近では流出する運動形態を取り、植生帯内では上昇流となることが認められた。この二次流により植生帯周辺部での主流速は水面付近に比べて底面付近の方で大きくなることが明かにされた。
- (2)水路中央に設置された植生帯上に越流が有る場合には、無い場合と比べて非植生域から植生へ向かう二次流が強まり、それに伴って主流速が底面付近で顕著に大きくなる。
- (3)水路片岸に設置した植生帯上に越流が有る場合には、無い場合に比べて二次流が強まり、二次流および主流速の等値線は複断面水路の流れに類似のパターンを示す。
- (4)水路中央に設置された植生帯上に越流が無い場合、平衡領域において観察された周期的な植生帯の揺

動は、流速変動の周期と一致することが認められた。

- (5)非平衡領域において、植生帯からの流出は植生帯上層で卓越し、それが二次流の形成に関与していることが示された。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 北村忠紀: 側岸に沿って植生群落のある水路での水面変動を伴う横断混合, 水工学論文集, 第36巻, pp.273-280, 1992
- 2) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流の横断方向流速差がもたらす付加的抵抗の評価, 第33回水理講演会論文集, pp.301-306, 1989
- 3) 池田駿介, 金沢稔, 大田賢一: 可撓性を有する沈水性植生上組織渦の三次元構造と穂波の発生, 土木学会論文集, No.515/Π-31, pp.33-43, 1995.5
- 4) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次, 北村忠紀: 直立性植生層を伴う流れ場の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.438/Π-17, pp.31-40, 1991.11
- 5) 福岡捷二, 渡部明英, 津森貴行: 樹木群を有する開水路における平面剪断流の構造とその解析, 土木学会論文集, No.491/Π-27, pp.41-50, 1994
- 6) 櫻津家久, 上矢博之, 定免英樹, 相良幸輝: 植生開水路流れの乱流構造に関する研究, 水工学論文集, 第41巻, pp.1061-1066, 1997.2
- 7) 河原能久, 玉井信行: 複断面開水路乱流の三次元数値解析, 第31回水理講演会論文集, pp.425-429, 1987

(1997.9.30受付)