

水生植物群落を伴う開水路流れの 水面変動と運動量輸送

FREE SURFACE FLUCTUATIONS AND MOMENTUM TRANSPORT IN OPEN CHANNEL FLOW WITH SUBMERGED VEGETATION

大本照憲¹・岡本隆之²

Terunori OHMOTO and Takayuki OKAMOTO

¹工博 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

²熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (同上)

Laboratory experiments were conducted using two-components electromagnetic current meter and particle image velocimetry (PIV) to clarify the interaction between main flow and flexible artificial vegetation, which was attached to the central bottom and sidewall 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 periodical components of velocity variations have strong correlation with water surface fluctuations and activated the momentum transport from main flow region to vegetation zone.

Key Words : PIV, water surface fluctuations, momentum transport, vegetation zone

1. はじめに

水生植物は、水質や底質の浄化能力を高め、河床変動を抑制し、生物の生息環境を創出すると同時に、親しみやすい水辺空間を醸成する等のプラス面を有している。しかし、洪水時の流水抵抗を増大させるといった治水上のマイナス面を持つことから、排除されることも少なくない。そのために河川管理、洪水対策、環境保全等の事業を実施する上で、植生を伴う流れの特性を十分に把握し、これらの知見を反映した河川環境を整備する事が重要となっている。

河川における植生分布が流れや流砂、河道特性量、さらには生物の生息環境に与える影響を検討した研究は数多く実施されている。それらは、有りのままの実河川を観察・観測し、生態系として総合的に捉えようとするものと、植生を伴う流れの物理現象の解明に主眼を置き、複雑な流体現象を単純化し素過程としてのメカニズムを解明するものとに大別される。

本研究に関連し、後者の視点に立つ研究事例として以下のものが挙げられる。

池田ら¹⁾は河床が植生で被われた場合には、植生層境界付近で主流速分布が変曲点を持つために流れが不安定となり周期的に渦を生じ、それが下流へ流される際に植生を変形し穂波が生じるものと考えた。そして植生層の境界に生じる渦の挙動を可視化によって調べ、その三次元的な構造を検討した。

これに対して河床の一部に植生群落を伴う場合においては、辻本ら²⁾が側岸部に植生を有する開水路流れの横断混合機構に関して、水面変動・流速変動は低周波で比較的規則正しくほぼ混合域での平均流速程度で移流されることを指摘した。

また、瀬津ら³⁾は、側岸に沈水性の植生を有する開水路では、水面は植生境界部を中心とし、同位相で山・谷の変動を繰り返し、結果として2つの交番を生じていることを明らかにした。また、石川ら⁴⁾、福岡ら⁵⁾は非植生域と植生域との間の運動量交換について境界混合係数を導入することにより植生の抵抗特性について検討し、植生帯境界付近に変曲点不安定によって水平大規模渦が生じることを示した。

既往の研究では、その大半は側岸に植生帯を設置した

場合や樹木群を対象とした場合が多く、中小河川の中央部に帯状に連なった比較的浅い流れに見られる沈水性の植物群落を対象にした研究事例は少ない。さらに、植生帯を伴う開水路流れにおいて水面変動が植生帯や二次流、乱れ特性に与える影響について十分な検討が成されていないとの指摘³⁾もある。

大本ら⁶⁾は水路中央に植生帯を設置し、植生帯上に越流がある場合には、植生帯周辺の主流部の底面付近から植生域へ流入、水面付近から流出する運動形態の二次流が存在し、乱流構造に与える影響の大きいことを指摘した。

以上のように植生を伴う流れの構造については比較的多くの研究がなされているが、模擬植生には剛直な円柱や多孔質体を用いることが多く、植生の揺動と水面変動を考慮した研究事例は極めて少ない。

そこで本研究では沈水性植生の密生度を同一にして曲げ剛性の異なる2種類の模擬植生を用いて、水面変動の縦・横断特性、水面変動と流速変動との相関および二次流や水面変動が与える主流部から植生帯への運動量輸送への影響について検討を行った。

2. 実験装置及び方法

実験は、図-1に示す長さ10m、幅40cm、高さ20cmの亚克力樹脂性の循環式可変勾配水路を用いて行った。植生帯の模型には、縦、横および厚さがそれぞれ30cm、5cmおよび0.3cmのプラスチック板に長さ5.5cmの模擬植生を5mm間隔で貼り付けたものを使用した。模擬植生は水流の変化に追従して撓み、柔軟性を有する6.10ナイロンブリュスル（高さ5.5cm、直径0.242mm、曲げ剛性 $EI=8.8 \times 10^4 \text{Pa}$ ）を用い、水流の変化に対して剛体としての特性を示すステンレス線（高さ5.5cm、直径0.250mm、曲げ剛性 $EI=206 \text{GPa}$ ）を用いた。

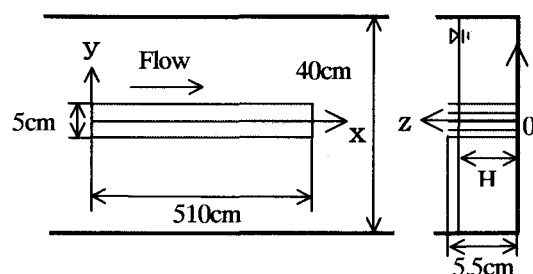


図-1 実験水路の概要

実験内容は流速変動と水面変動の同時計測、水面変動の3点同時計測、流速の多点同時測定である。流速変動と水面変動の同時計測には電磁流速計と超音波水位計を用い、流速の多点同時測定には面的計測が可能なPIV（Particle-Image-Velocimetry）法を用いて行った。

電磁流速計と超音波水位計の出力信号は100Hzで、AD変換した後1測点4096個のデータに関して統計処理が施された。PIV（図-2参照）は光源に空冷式ダブルパルスYAGレーザー（出力25mj）を用いた。水路右岸の側壁から水平に照射されたシート光の厚さは1mm、パルス間隔は1000 μsec に設定した。

レーザー光とCCDカメラを同期させて読み込まれた可視化画像は30fps（frame per second）、960 $\times$ 1018（pixel）のモノクロビデオ画像としてパーソナルコンピュータのハードディスクに記録され、PIV法によって処理された。流速のサンプリング周波数は15Hz、トレーサとして粒径30 μm 、比重1.02のナイロン粒子を使用した。

座標系は植生帯先端の水路中央部底面を原点とし流下方向にx軸、横断方向にy軸、鉛直上方にz軸をとり右手系とし、それぞれの流速成分をu、v、wとあらわす。また表-1に実験条件を示す。

PIVの計測対象領域はRun1、Run2では $x=317\text{cm} \sim 323\text{cm}$ 、 $y=-3.0\text{cm} \sim -8.5\text{cm}$ の $6\text{cm} \times 5.5\text{cm}$ で、水面付近の $z=4.0\text{cm}$ 、半水深付近の $z=2.5\text{cm}$ 、底面付近の $z=1.0\text{cm}$ の3箇所計測を行い、Run3、Run4では $x=317\text{cm} \sim 322.5\text{cm}$ 、 $y=-3.0\text{cm} \sim -7.5\text{cm}$ の $5.5\text{cm} \times 4.5\text{cm}$ で、水面付近の $z=6\text{cm}$ 、半水深付近の $z=3.8\text{cm}$ 、底面付近の $z=1.5\text{cm}$ の3点で計測を行った。得られたデータはRun1、Run2、Run3、Run4ともすべて流下方向に平均化を行った。また、横断方向については水路幅 $B=40\text{cm}$ で、鉛直方向には水深 H で無次元化を行った。

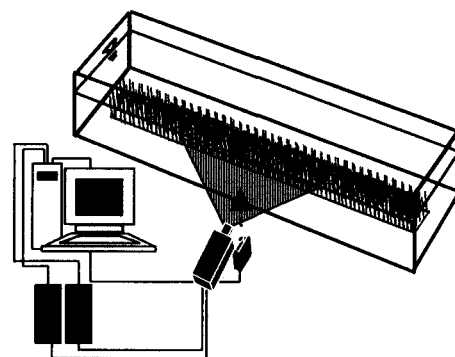


図-2 PIVシステムの概要

表-1 実験条件

	Run1(非越流)	Run2(非越流)	Run3(越流)	Run4(越流)
流量 $Q(\text{l/s})$	6.0	6.0	6.0	6.0
水深 $H(\text{cm})$	5.0	5.0	7.5	7.5
断面平均流速 $U_m(\text{cm/s})$	30.0	30.0	20.0	20.0
水路勾配 I	1/1000	1/1000	1/1000	1/1000
植生材料	ナイロン系	ステンレス線	ナイロン系	ステンレス線
植生直径 $d(\text{mm})$	0.242	0.25	0.242	0.25
測定位置 $x(\text{cm})$	320	320	320	320

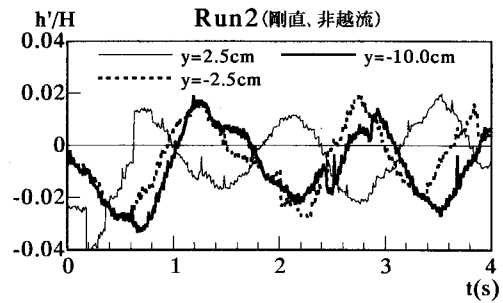
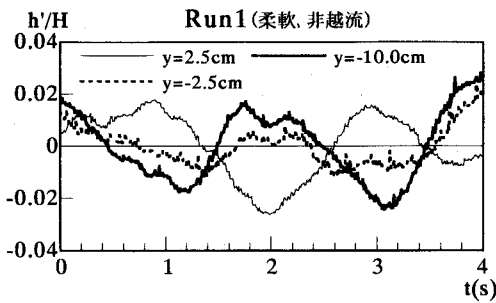


図-3 水面振動の時系列（横断方向）

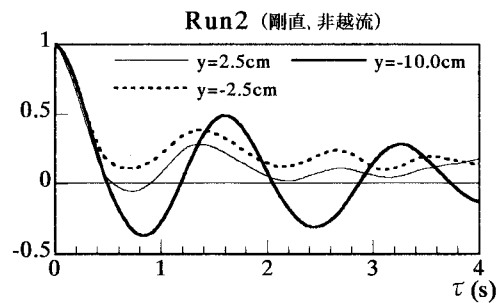
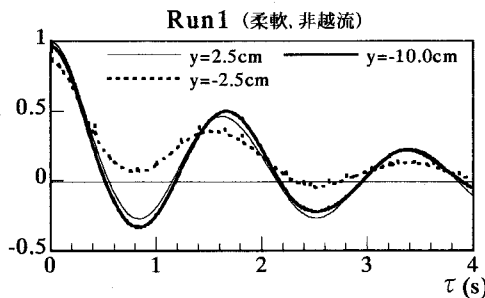


図-4 水面振動の自己相関（横断方向）

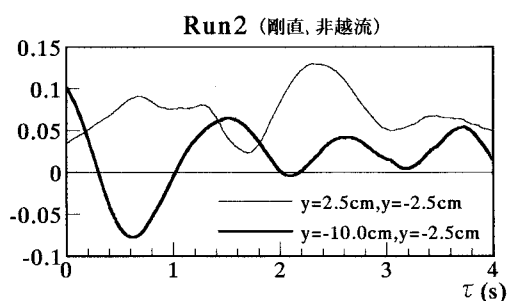
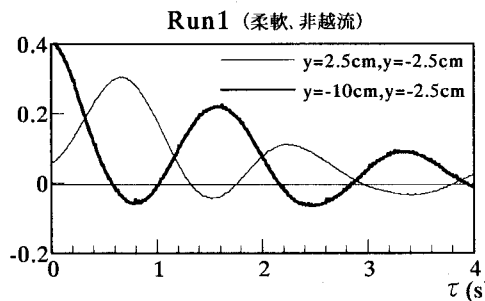


図-5 水面振動の相互相関（横断方向）

3. 水面変動の横断方向変化

(1) 時系列特性

図-3は横断方向の3点における水面変動の同時計測の時系列データである。縦軸は水面高の変動成分 h' を水深 H で無次元化した値を示す。超音波水位計は $x=320\text{cm}$ で $y=-2.5\text{cm}$, 2.5cm , -10.0cm の3箇所に設置した。

非越流型の柔軟な植生帯を有する Run1 の $y=-2.5\text{cm}$, -10.0cm において水面変動は、同位相を示し、植生帯外では横断方向に形状や大きさを顕著に変えないことが目視観察からも確認された。また、植生帯境界近傍の $y=-2.5\text{cm}$, 2.5cm では逆位相を示し、水面変動は究めて周期性の高いことが確認できる。

非越流型の剛直な植生帯を有する Run2 の $y=-10\text{cm}$, -2.5cm では Run1 と同様に水面変動は同位相を示し、横断方向に形や大きさを変えず、規則的波形であることが分かる。植生帯境界域である $y=2.5\text{cm}$, -2.5cm では逆位相になっており、植生帯内で横断方向に水位を変化させていることが認められる。両ケースとも水面変動の振幅は水深の4%程度であることから、横断方向の水面勾配は植生帯内では1/125に達することが分かる。

(2) 自己相関及び相互相関

図-4および図-5は、それぞれ水面変動の自己相関係数および相互相関係数を示す。図-4からRun1では $y=2.5\text{cm}$, -2.5cm , -10.0cm の3点ともセカンドピークがほぼ $1.5\text{s} \sim 1.6\text{s}$ と一致していることから横断方向での周期性が高いことが分かる。Run2においては、約 $1.4\text{s} \sim 1.6\text{s}$ であり、Run1と同程度に横断方向での周期性が高いことが確認できる。

図-5の相互相関から、Run1では $y=2.5\text{cm}$, -2.5cm において位相差は約 $0.7\text{s} \sim 0.8\text{s}$ となっており半周期で最も相関性が高いことから、植生帯境界域で逆位相になっていることがわかる。また、 $y=-10.0\text{cm}$, -2.5cm においては、位相差は無く2点は同位相である。

Run2においては、 $y=2.5\text{cm}$, -2.5cm の位相差は、約 $0.8\text{s} \sim 1.0\text{s}$ となっており、ほぼ半周期で相関性が高いことから植生帯両境界域で逆位相になっていることがわかる。

また、 $y=-10.0\text{cm}$, -2.5cm については、Run1と同様に位相差が約 1.6s となっており、2点間では同位相である。

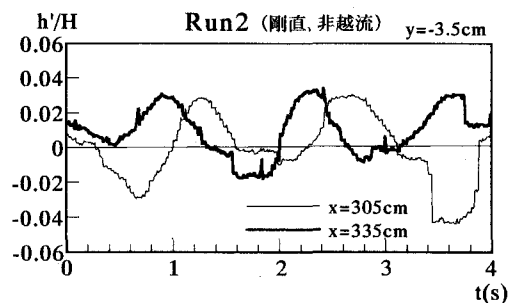
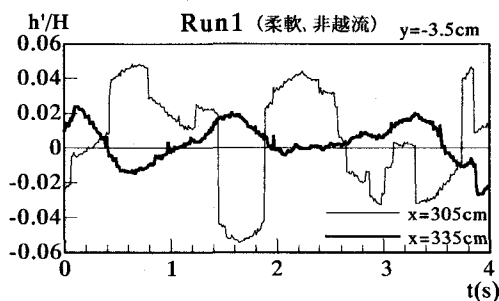


図-6 水面振動の時系列 (流下方向)

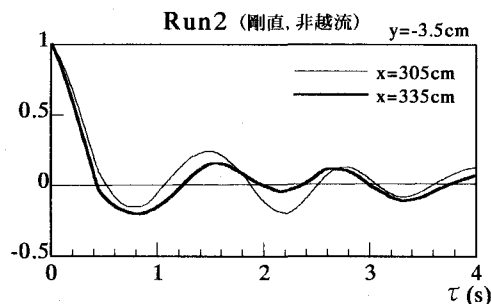
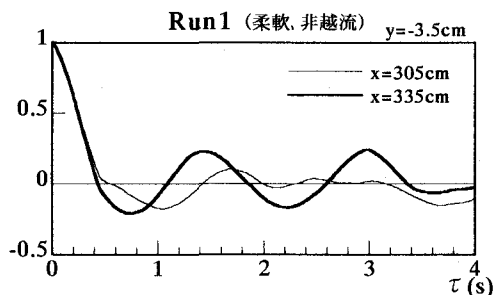


図-7 水面振動の自己相関 (流下方向)

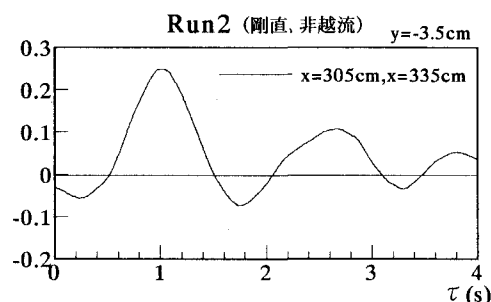
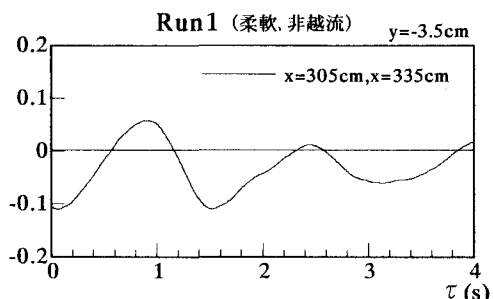


図-8 水面振動の相互相関 (流下方向)

4. 水面変動の流下方向変化

(1) 時系列特性

図-6 は超音波水位計から得られた時系列データである。計測位置は植生帯右境界域である $y=-3.5\text{cm}$ で、2つの超音波水位計は流下方向に 30cm 離れている。縦軸は水面高の変動成分 h' を水深 H で無次元化した値を示す。Run1, Run2 とも $x=305\text{cm}$ と $x=335\text{cm}$ でのピークの時間差は約 1.0s である。振幅には Run1, Run2 において顕著な差はみられなかった。

(2) 自己相関及び相互相関

図-7 及び図-8 は超音波水位計を縦断方向に2点同時計測を行ったときの自己相関係数及び相互相関係数を示す。図-7 の自己相関から、Run1 および Run2 とも $x=305\text{cm}$, $x=335\text{cm}$ においてセカンドピークが $1.4\text{s} \sim 1.6\text{s}$ となっており、縦断方向にも周期性の高いことがわかる。

次に図-8 の相互相関から、遅れ時間は Run1 では約 0.91s , Run2 では約 1.01s となっている。これより Run1 および Run2 における水面の波速 C_1 , C_2 および流下方向の波長 L_1 , L_2 は、 $C_1=33.0\text{ cm/s}$, $C_2=29.7\text{ cm/s}$, $L_1=49.5\text{ cm}$, $L_2=44.6\text{ cm}$ である。

植生帯近傍に発生した水面変動の波速は断面平均流速に近い値を取り、質量や運動量輸送を伴う流動性の高い波であることが示唆される。さらに、水面変動の形状は、植生境界近傍の主流部に峰部と谷部が千鳥状に配列し、その代表的長さスケールは横断方向には植生幅スケール、流下方向には10倍の水深スケールである。

5. 水面変動と流速の同時計測

(1) 時系列特性

図-9 は水面変動と流速変動の時系列データである。超音波水位計を $x=320\text{cm}$, $y=2.5\text{cm}$ に設置し、電磁流速計を $x=320\text{cm}$, $y=2.5\text{cm}$, 半水深付近の $z=3.0\text{cm}$ に設置した。 u , v は断面平均流速 U_m で無次元化し、水面変動成分 h' は水深 H で無次元化し正弦波で近似化した。Run1 および Run2 のいずれも流速変動 u/U_m と v/U_m は逆位相を示し、水面変動と同様に周期性が高いことが分かる。次に水面変動と流速変動との関係は、水面変動 h'/H が下降期においては、横断方向の瞬間流速成分 v/U_m は非植生域から植生帯内に流入する形態をとり h'/H がゼロ点通過

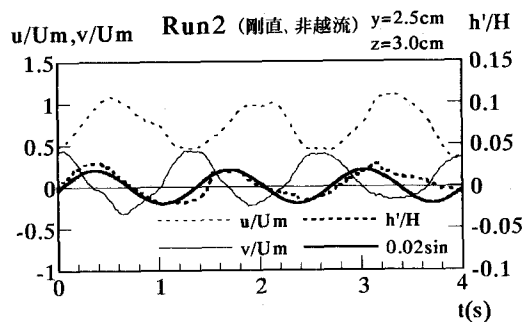
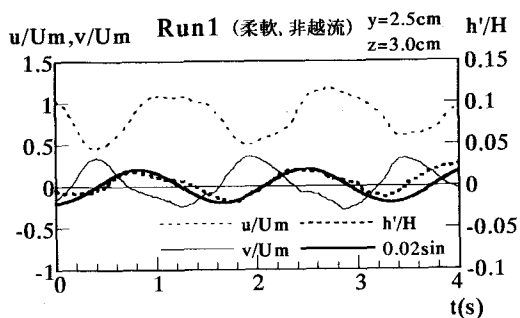


図-9 水面振動と流速変動の時系列

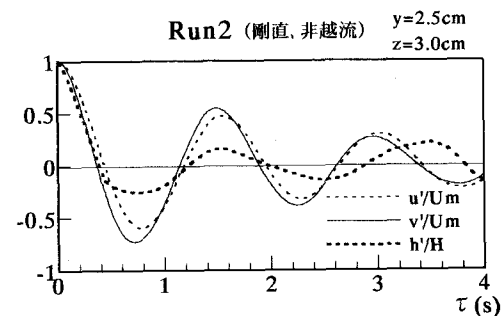
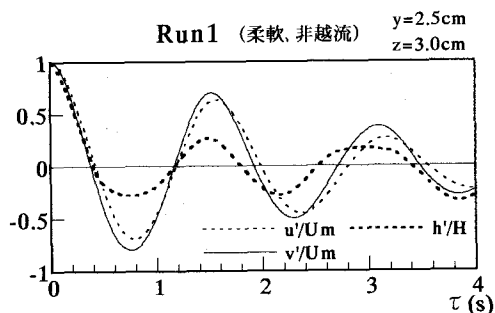


図-10 水面振動と流速変動の自己相関

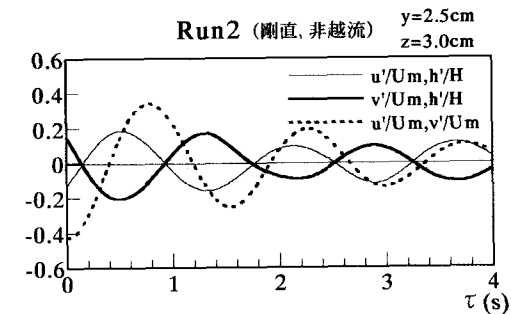
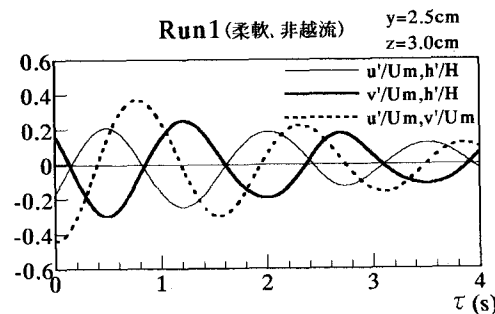


図-11 水面振動と流速変動の相互相関

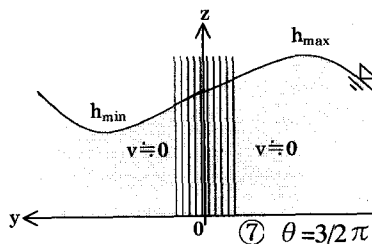
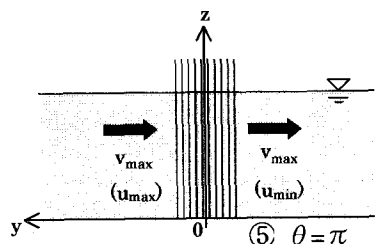
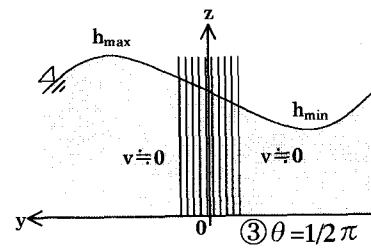
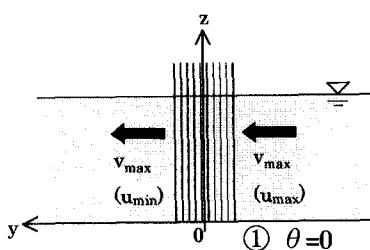
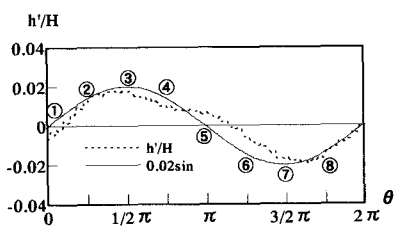


図-12 水面振動と流速変動の相関に関する概念図

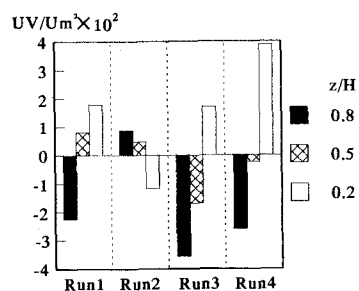


図-13 移流による運動量輸送 UV の鉛直方向変化

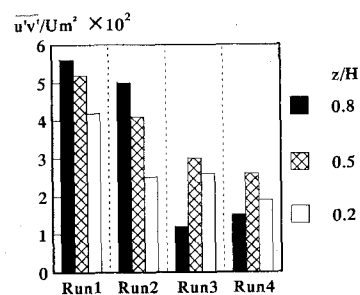


図-14 乱れによる運動量輸送 $\overline{u'v'}$ の鉛直方向変化

するとき主流速 u/U_m および植生帯への流入速度 v/U_m は極大値を示す。水面変動 h'/H が上昇期においては、横断方向の瞬間流速成分 v/U_m は植生帯内から植生帯外に流出する形態を取り、 h'/H がゼロ点を通過するとき主流速 u/U_m は極小値を、横断方向流速 v/U_m の流出速度は極大値を示す。水面変動の峰部では、主流速 u/U_m は加速傾向にあり、横断方向の流れ速度 v/U_m はゼロに近い値を示す。一方、水面変動の谷部では主流速 u/U_m は減速傾向にあり横断方向の流れ速度 v/U_m はゼロに近い値を示す。

(2) 自己相関及び相互相関

図-10 は水面変動と流速の同時計測を行ったときの自己相関である。Run1 についてみると u/U_m と v/U_m とともにセカンドピークが約 1.5s~1.6s となっており、主流速と横断方向流速は周期性が高いことがわかる。 h'/H も同様にセカンドピークが約 1.5s~1.6s となっている。Run2 においても同様の結果が得られた。次に図-11 は水面変動と流速変動の相互相関係数である。Run1, Run2 とともに u'/U_m , v'/U_m の位相差は約 0.7s~0.8s である。半周期で最も相関性の高いことから u'/U_m , v'/U_m は逆位相になっていることがわかり、時系列の結果と一致する。次に u'/U_m , h'/H , と v'/U_m , h'/H であるが、Run1, Run2 とともに v'/U_m , h'/H の位相差は約 0.6s, u'/U_m , h'/H の位相差は約 1.2s となっている。

以上より得られた結果を総合すれば、水面変動と横断方向の流速成分との関係は図-12 の様に示される。

中央に設置された有限幅の植生帯が側岸の植生帯と大きく異なる点として、植生帯の両境界が法線方向の流速成分を許容するために、横断方向の流速成分は強まることが示唆される。

6. 植生帯境界における運動量輸送

図-13 および図-14 は、PIV による実測データを基に表-1 の Run 1~Run4 の境界条件に対応した植生境界近傍 $y/B=-0.075$ における移流による運動量輸送 UV および乱れ成分 v' による運動量輸送 $\overline{u'v'}$ を示す。

図-13 から、主流部から植生帯への移流による運動量輸送は、全般的傾向として底面付近で流入、水面付近で流出する傾向を持ち、越流型植生は非越流型植生に較べて大きな値を取り、二次流による植生帯への運動量輸送は無視できない。なお、剛直な非越流型植生 Run2 は、他のケースに較べて移流による運動量輸送に傾向が異なる。この点については、非越流型植生では横断方向の二次流成分が断面平均流速の数パーセントと微弱であり、計測精度を含めて再検討する必要がある。

図-14 より、主流部から植生帯への乱れによる運動量輸送は、非越流型植生は越流型植生に較べて大きな値を取り、可撓性の植生は剛直な植生に較べ非越流型では若

干大きく、越流型では同程度である。

また、図-13 と図-14 との比較から、主流部から植生帯への運動量輸送は、非越流型植生では乱れによる運動量輸送が卓越し、越流型植生では移流による運動量輸送が無視できないことが認められる。

非越流型植生では越流型植生⁶⁾に較べて乱れによる運動量輸送が卓越したのは、植生帯を透過する周期的な横断方向の流速成分が主流方向成分と強い相関を持ち、流動性の高い水面変動が横断方向の流速成分をさらに強めたことが主因と考えられる。

7. おわりに

本研究では植生の密生度を同一にした可撓性および剛直性の模擬植生を用い、植生流れにおける水面変動特性、水面変動と流速変動との相関および水面変動が与える主流部から植生帯への運動量輸送への影響について検討を行った。得られた知見を列挙すると次の通りである。

- 1) 植生帯近傍に発生した水面変動の波速は断面平均流速に近い値を取り、質量や運動量輸送を伴う流動性の高い波である。さらに、水面変動の形状は、植生境界近傍の主流部に峰部と谷部が千鳥状に配列し、その代表的長さスケールは横断方向には植生幅スケール、流下方向には10倍の水深スケールである。
- 2) 水面変動と横断方向の流速変動との関係は模式的に図-12の様に示された。中央に設置された有限幅の植生帯が側岸の植生帯と大きく異なる点として、植生帯の両境界が法線方向の流速成分を許容するために、横断方向の流速成分は強まることが示唆される。
- 3) 主流部から植生帯への運動量輸送は、非越流型植生では乱れによる運動量輸送が卓越し、越流型植生では移流による運動量輸送が無視できないことが認められる。非越流型植生では越流型植生に較べて乱れによる運動量輸送が卓越したのは、植生帯を透過する周期的な横断方向の流速成分が主流方向成分と強い相関を持ち、流動性の高い水面変動が横断方向の流速成分をさらに強めたことが主因と考えられる。

参考文献

- 1) 池田俊介, 金沢稔, 太田賢一: 土木学会論文集 No.515/II-31, pp.33-43, 1995.
- 2) 辻本哲郎, 北村忠紀: 土木学会論文集 No.491/II-27, pp.61-70, 1994.
- 3) 瀬津家久, 鬼束幸樹, 池谷和也: 水工学論文集, 第44巻, pp.783-788, 2000.
- 4) 石川忠晴, 田中昌宏: 第31回水理講演会論文集, pp.329-333, 1987.
- 5) 福岡捷二, 藤田光一: 第33回水理講演会論文集, pp.301-306, 1989.
- 6) 大本照憲, 福井洋幸, 林俊一郎: 水工学論文集, 第42巻, pp.427-432, 1998.

(2002. 9. 30受付)