

植生開水路流れの乱流構造に関する実験的研究

Experimental Study on Turbulent Structures of Partly Vegetated Open-channel Flows

欄津家久*・上矢博之**・定免英樹**・相良幸輝***

By Iehisa NEZU, Hiroyuki KAMIYA, Hideki JOHMEN and Yuki SAGARA

Vegetation in rivers decreases the flow capacity and therefore has been removed from river basin. However, the importance of vegetated zone in rivers has recently been recognized not only for river management but also for water flow environment. Turbulent structures of vegetated open-channel flows and the associated sediment transport are investigated by some researchers.

In this study, turbulent measurements in partly vegetated open-channel flows were accurately conducted by using a fiber-optic laser Doppler anemometer (FLDA). Basic turbulent structures such as mean velocity and turbulence were experimentally obtained and discussed as comparing compound open-channel flows.

KeyWords : Partly Vegetated Open-Channel Flow, FLDA, River Environments

1. はじめに

近年、河川の整備や保全といった観点において従来の治水や利水機能のみならず親水機能が積極的に求められている。実際ほとんど全ての一級河川において河川環境管理基本計画が策定されるなど親水を意識した河川事業が進められている。こうした現状にあつて河川敷に繁茂する植生は、親しみやすい水辺環境を醸成し、また様々な生態棲息の環境を提供する役割を果たすので河川環境を考慮に入れた設計論を展開する上で重要な要素となっている。

こうした河道内における植生の重要性から、その分布形態や流れのパターンに関する実験及び研究が多く進められている。辻本・北村¹⁾は植生群が河道内に存在する場合の流れの横断混合機構、特に低周波の水深変動、横断方向流速及び主流速変動の相互相関をモデル化して実験的に捉え、一次元的な解析から、両者の相互関係の解釈を試みている。さらに、福岡ら²⁾は洪水時の水位予測にあたり植生の効果を取り込むことを主体とし、石狩川における洪水を対象に、流速分布と水位変化を計算し、実測値と比較・検討している。一方、欄津ら³⁾は、人工河川を対象として電磁流速計を用いて流速三成分全ての計測・解

* 正会員 工博 京都大学大学院工学研究科教授 環境地球工学教室

(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 学生員 京都大学大学院工学研究科 環境地球工学専攻

*** 学生員 京都大学工学部 土木工学科

表-1 実験条件

Case	Bed Slope S	Depth H (cm)	Height of Vegetation H_v (cm)	Diameter of Vegetation D (cm)	Discharge Q (l/s)	Width of Vegetation B_v (cm)	Spacing of Vegetation S_v (cm)	Froude Number Fr	Reynolds Number $Re \times 10^3$	Density of Vegetation λ H_v
VS1	1/3000	10.0	5.0	0.2	2.6	20.0	1.0	0.060	5.6	1.00
VS2	1/4000						2.0	0.069	5.6	0.25
VS4	1/5000						4.0	0.069	5.7	0.06

析を行い、河川乱流の計測結果と実験室データ及び数値計算値とを比較検討している。

植生開水路流れと同様な流れである複断面開水路流れをファイバーレーザー流速計(FLDA)で高精度に計測した例に富永・棚瀬⁴⁾の研究があるが、植生流れの乱流計測は従来の研究ではホットフィルム流速計によるものが大半であった。そこで、本研究では高精度なデータを得るために4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザー流速計を用いて植生開水路流れの乱流計測を行い、その乱流構造について実験結果に基づいて考察した。

2. 実験装置および実験方法

本実験で使用した水路は全長10m、幅 $B=40$ cmの可変勾配型循環式直線水路であり、特に計測用区間3mは水路側壁と底面とが光学ガラス製となっている。実験装置を図-1に示す。瞬間流速の計測には水路側壁と上方から4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザー流速計(DANTEC社製)

を用いて高精度に (u,v,w) の三次元計測を行った。水路上流端には遷移区間を設け、そこから、水路半幅に設置された植生帯の全長8mにわたってポイントゲージにより水面形を検討したところ上流端から5~6mの範囲では流れが十分に発達した等流であることが確認されたので上流から5.8mの場所を計測断面として選んだ。さらに水路半断面($B_v=20$ cm)に高さ $H_v=5$ cm、直径 $D=2$ mmの真ちゅう製植生棒を設置した。植生配置を図-2に示した。植生密度としては三通り設け、植生棒を流下(x)方向と水路横断(z)方向ともに均等な一辺が1cm,2cm,4cmの正方形格子状(各々case VS1,VS2,VS4とする)に配置した。いずれのケースにおいても流量 $Q=2.6$ l/sec、水深 $H=10$ cmに設定した。FLDAによる (u,w) の計測の際には水路上方から水面を通しての計測となるので水面変動による影響をできるだけ少なくするために $Fr=0.06$ 程度の緩やかな流れとした。植生領域と非植生領域の境界部が密になるように水路横断、鉛直方向ともに約1cm弱のメッシュを計測断面に設け約1000点の点計測を行なった。データのサンプリング時間は約60secであり、平均サンプリング周波数は約200Hzであった。実験ケースおよび水理条件は表-1に示す。ここで植生密度として無次元量 λH_v ($\lambda=D/S_v$ S_v : 植生間隔)を導入した。

3. 実験結果および考察

3. 1 平均主流速分布および二次流分布

図-3(a)に二次流 (V,W) を断面最大流速 U_{max} で無次元化して U_{max} の2%を単位矢印として点計測をした全ての点のベクトル値を表示した。また、図-3(b)は本研究の植生帯と幅、高さともに同一の高水敷を設置して同一の流量、水深で行われたNezu⁵⁾の滑面の複断面開水路の実験結果である。複断面開水路の場合には境界部付近から斜昇流が斜め上方に発生し、低水路中心部で下降流へと変化していることがわかる。また、高水敷上において二次流セルがみられる。これに対し植生開水路流れではcase VS2,4では複断面流

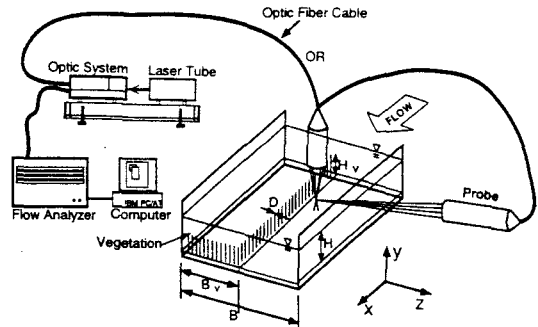


図-1 実験装置

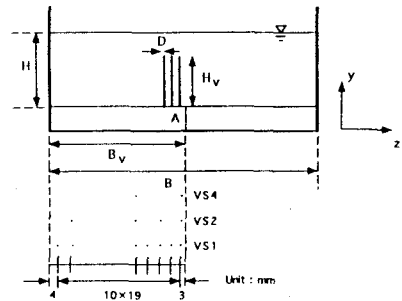


図-2 植生配置

れの特徴である斜昇流は存在しないがVS1では境界部で斜昇流が確認できる。このことから植生密度の大きい植生開水路流れに関しては複断面開水路と流れの構造が比較的、類似しているといえる。また、いずれのケースにおいても植生領域上方において二次流セルが存在せず植生領域で水面の大規模平面渦の影響により発生しているかなり大きな循環流がある。水深、横断方向ともに植生内領域と非植生領域との流速差によってこれら両領域において複断面流れより激しい運動量輸送が行われている。さらに植生密度が大きくなるほど二次流ベクトルの大きさが大きくなっているが、これは植生内と非植生領域とで流速差が増大するので運動量輸送が激しくなるためであろう。非植生領域でも複断面流れの低水路よりも複雑な運動量輸送が行われているが複断面流れの低水路の場合とは異なり非植生領域底部から自由水面へと向かう上昇流が生じている。非植生領域での上昇流は植生密度による差異はそれほどない。上述した両開水路流れの相違が、以下で検討する主流速や乱れ特性量に、とりわけ植生・非植生領域の境界部での特性に影響を与えていることが考えられる。

図-4は時間平均された主流速 U の鉛直方向の分布をcaseVS1について示した例である。この際、横断方向の着目断面を非植生領域($z/H=3.0$)、植生領域($z/H=1.0, 1.5$)、並びに両領域の境界付近($z/H=2.2$)にとった。VS1,2ともいずれの水深においても非植生領域中央部から植生領域に遷移するにつれて流速の低減が認められ、その低減の度合は植生密度の高いVS1の方が大きい。また境界付近では両ケースとも主流速の水深方向の変化はみられない。植生領域では着目断面が $z/H=1.0$ 、 $z/H=1.5$ いずれの場合にも水深方向の主流速分布はほぼ同一の傾向を示しており、とりわけ植生中($y/H<0.5$)では、主流速分布は横断方向 z の値によらず一定の指数型分布をしている。図-5(a)は各ケースにつきその U_{max} で U を無次元化した等値線である。各ケースを比較すると最も密度が低いcaseVS4を除き、非植生領域中央部から植生領域に遷移するにつれて流速は低減し、この傾向は植生が密なほど顕著であることが再確認できる。植生領域上方では各ケースとも水深方向の変化はあまりなくほぼ等流速域となっているが植生先端部付近の高さに着目するとVS2、

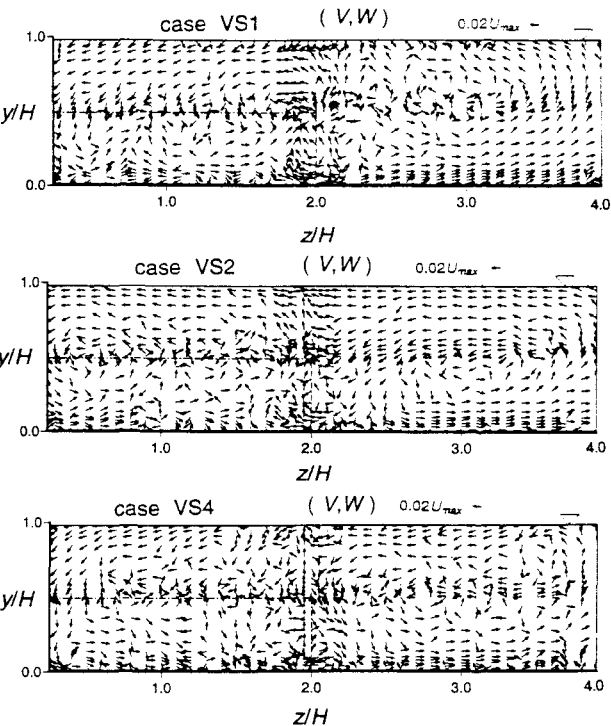


図-3(a) 二次流ベクトル (植生流れ)

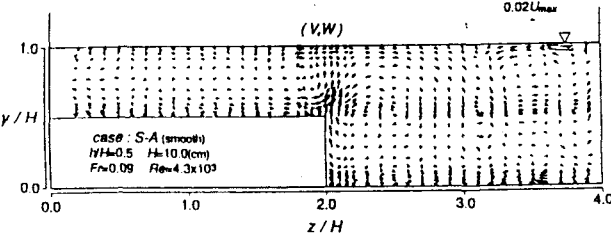


図-3(b) 二次流ベクトル (複断面流れ)

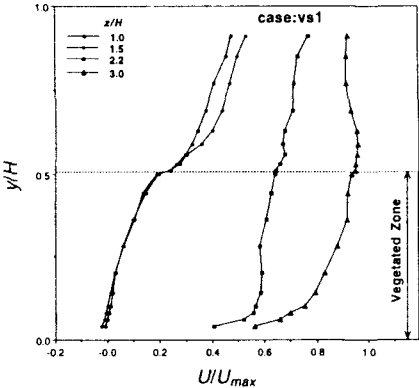


図-4 平均主流速 U の鉛直方向分布

はほぼ同一の傾向を示しており、とりわけ植生中($y/H<0.5$)では、主流速分布は横断方向 z の値によらず一定の指数型分布をしている。図-5(a)は各ケースにつきその U_{max} で U を無次元化した等値線である。各ケースを比較すると最も密度が低いcaseVS4を除き、非植生領域中央部から植生領域に遷移するにつれて流速は低減し、この傾向は植生が密なほど顕著であることが再確認できる。植生領域上方では各ケースとも水深方向の変化はあまりなくほぼ等流速域となっているが植生先端部付近の高さに着目するとVS2、

VS4では流速勾配が大きくなり主流が減速し複断面開水路の高水敷底面のような抵抗力が加えられていると考えられる。植生密度が最小のVS4では境界部で等値線が突出している特徴を有するが、これは非植生領域から植生領域に遷移する際に植生棒の間隔が大きくなっているために、植生棒がほぼ単一粗度とみなせ、その効果によるものと考えられる。さらに植生領域上方の非植生領域に対する流速比も植生の密度が高くなるほど小さくなり、より植生による抵抗効果が大きくなっている。図-5(b)にはNezu⁵⁾の複断面開水路の実験結果を示す。最も植生密度の大きいVS1と複断面開水路とを比較すると、ほぼ同様な分布形状を示していることから、植生密度が大きい場合には形状的にも主流速 U においても複断面開水路に近い傾向を有すると思われる。しかしVS2,4では複断面開水路流れと違い、複断面高水敷端部から低水路側の水面に向かって突出するようなコンター形状は示していない。このことから、高水敷端部付近の乱れの非等方性が原因の組織渦による斜昇流は一般に植生開水路流れでは生じておらず、このため植生開水路流れは乱流構造的に、すなわち運動量輸送、物質輸送の形態としても複断面開水路流れとは異なると考えられる。

3. 2 乱れ特性量

図-6(a)は対数則分布から評価された非植生領域の摩擦速度の平均値 $\overline{U_{*nv}}$ を用いてcase VS1の鉛直方向および横断方向の乱れ強度 v' および w' を無次元化したコンター図である。いずれのコンターも植生領域と非植生領域との境界付近において乱れ強度が著しく増大した領域が存在している。そしてこの結果は乱流モデルからも推測されている⁶⁾。Nezu⁵⁾の複断面開水路の実験結果

図-6(b)と比較すると植生開水路流れの方が乱れの最も強い領域がわずかに y/H が低めのところに位置していることがわかる。これは複断面開水路の高水敷が非透過性の粗度であるのに対して植生は透過性粗度であるためであり、水路幅方向の運動量輸送が複断面開水路流れよりも盛んに行われていることが推察される。また図-6(a)から v' は植生領域上方へ等値線が張り出しているが、 w' は鉛直方向に等値線が突出していることが見てとれる。このこ

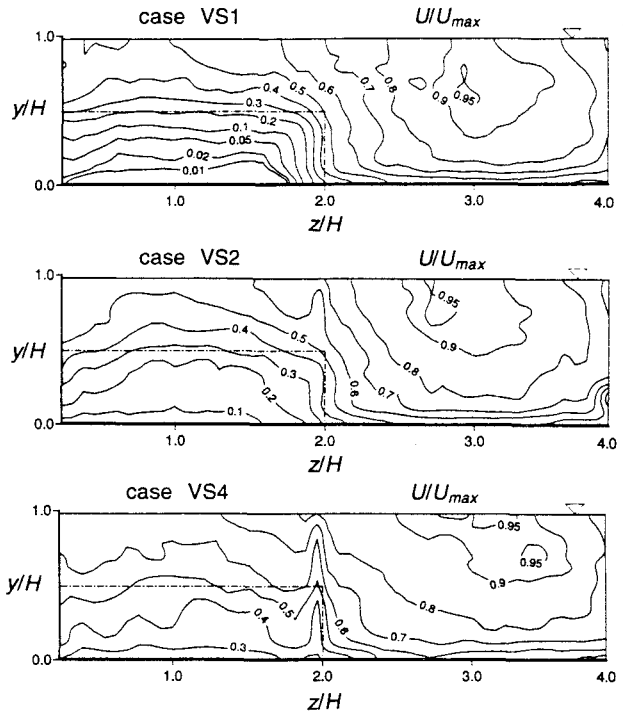


図-5(a) 平均主流速 U のコンター (植生流れ)

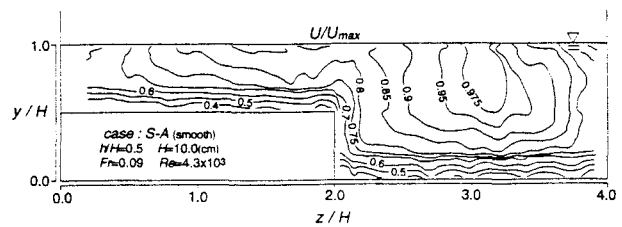


図-5(b) 平均主流速 U のコンター (複断面流れ)

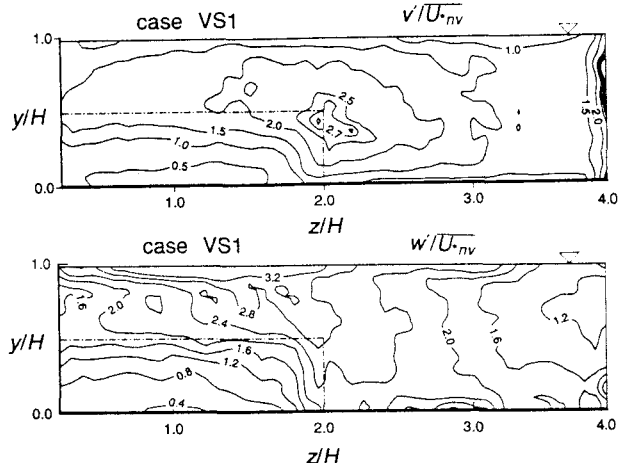


図-6(a) 乱れ強度 v', w' のコンター (植生流れ)

とから境界部付近において運動量の交換が様々な方向に対して非常に活発であり、この付近が乱れの極めて強い非等方性を示し、複断面開水路の高水敷と同様に植生領域が開水路流れの乱流構造に重要な影響を与えていることが確認できる。

次に主流速の鉛直方向のシアであるレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ と横断方向のレイノルズ応力である $-\overline{uw}$ の各々の値を $\overline{U_{nv}}$ で無次元化したコンターを図-7(a)、図-8(a)に示す。なお、コンター値が負である領域には図中に斜線を施した。まず、 $-\overline{uv}$ の等値線に見られる特徴はいずれのケースにおいても自由水面付近と植生領域底部で負の領域が出現していることである。また提示したのはcaseVS1のみであるが他のケースと較べて植生密度の増加に伴い、自由水面付近、植生領域底部ともに負の領域が拡大している。図-7(b)に複断面開水路の実験結果を示す。この場合も自由水面付近で負の領域が存在し、この傾向は単断面開水路流れの場合と一致しているが、これは境界部から十分離れた領域では植生や高水敷の影響を受けていないと思われる。複断面流れでも境界部に負の領域が出現しているが、若干 y/H がより高いところに現れている点で両者は異なっている。また、コンター値は各ケースとも植生領域上方の境界部付近で最大値をとっており、植生密度が大きくなるとその値も大きくなっている。鉛直方向のレイノルズ応力と主流速の鉛直方向の勾配との関係は渦動粘性モデルでは

$$-\overline{uv} = \nu_y \partial U / \partial y \quad (1)$$

で表される。ここに ν_y は鉛直方向の渦動粘性係数である。滑面における渦動粘性モデルの適用の妥当性は欄津・阿部ら(1995)⁷⁾で報告されており、caseVS1の非植生領域についてみると、図-7(a)と図-4での $\partial U / \partial y$ の符号が同一であることと式(1)から、この領域での渦動粘性モデルの適用の妥当性が確認される。植生領域上方についても図-4の $y/H > 0.5$ における $\partial U / \partial y$ の符号が正であるから植生領域上方では渦動粘性モデルの適用が可能であることを示唆している。

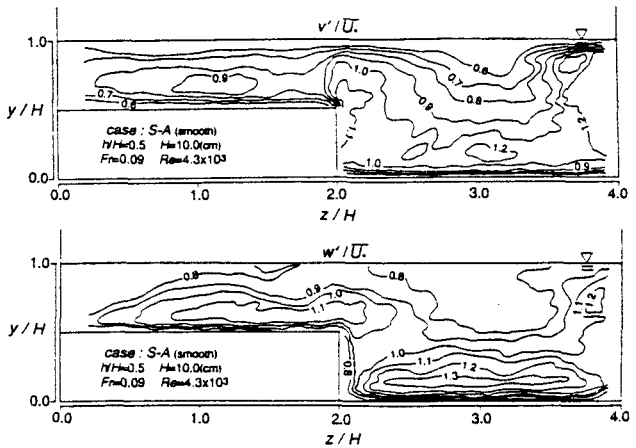


図-6(b) 乱れ強度 v' , w' のコンター (複断面流れ)

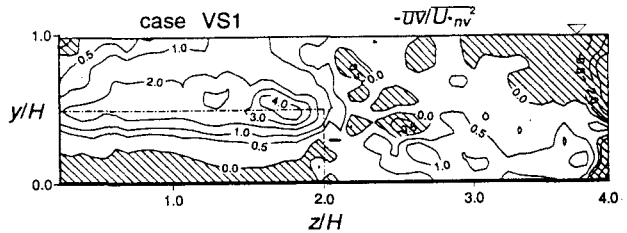


図-7(a) レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ のコンター (植生流れ)

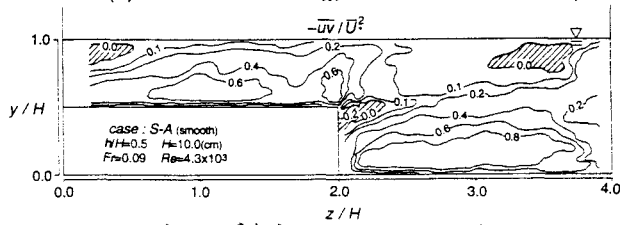


図-7(b) レイノルズ応力 $-\overline{uv}$ のコンター (複断面流れ)

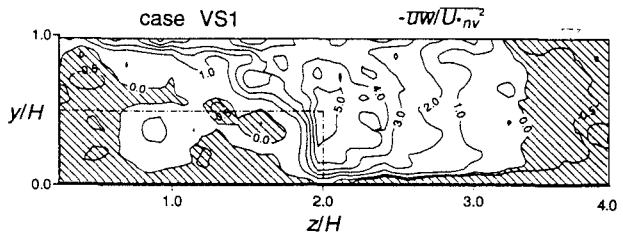


図-8(a) レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ のコンター (植生流れ)

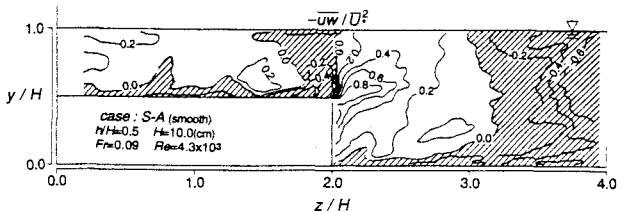


図-8(b) レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ のコンター (複断面流れ)

図-8(b) レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ のコンター (複断面流れ)

最後に $-\overline{uw}$ の等値線は、いずれのケースにおいても植生領域底部と非植生領域側方部に負の領域があることが特徴となっている。Nezu⁵⁾の複断面流れの実験結果を図-8(b)に示す。これらの低水路と非植生領域とを比較すると高水敷や植生帯からの影響が小さい側方部で両者とも $-\overline{uw}$ のコンター値が負の領域が見られる。そして、この領域の大きさは植生密度が変化してもほとんど変化していないことから、この部分では植生領域が流れに及ぼしている影響は小さいと考えられる。また複断面流れの場合には境界部でコンター値の符号が変化し、境界部において横断方向に大きな運動量輸送があることがわかるが、植生流れの場合にはいずれの植生密度においてもこの傾向は認められない。植生領域底部の負の領域は植生密度が増大するにつれて大きくなっているが、密度最小のcaseVS4の場合には $-\overline{uw}$ の値は横断方向に複雑な符号変化を示している。図-9に植生領域について横断方向のレイノルズ応力 $-\overline{uw}/\overline{U_{nv}}^2$ の分布を示す。caseVS4について水深方向の着目断面が植生内領域($y/H=0.28$)にある場合と植生上領域($y/H=0.77$)にある場合とを図示した。植生上領域では $-\overline{uw}$ の符号が側壁から境界部に近づくにつれて領域中央部付近で負から正に転じているので横断方向の運動量輸送が生じていることがわかる。植生内部領域では $-\overline{uw}$ の値も植生上領域よりも大きく、またcaseVS4の植生棒間隔($S=4cm$)に対応してその符号も変化しているので植生内では植生上領域よりも激しく横断方向の運動量が輸送されていると考えられ、また大規模な組織構造が存在することが示唆される。さらに植生内領域 $y/H=0.28$ に着目して $-\overline{uw}$ の横断方向の変化をみると密度の大きいVS1の方がVS4より値も符号変化も小さいので植生内領域ではVS4の方がVS1より横断方向の運動量輸送が活発に行われていると思われる。 $-\overline{uv}$ の場合と同様に図-8(a)と図-4の平均主流速コンター図より各ケースとも植生領域上方では $-\overline{uw}$ と $\partial U/\partial y$ の符号がほぼ一致していて、この領域でも渦動粘性モデルの適用が可能であると考えられる。

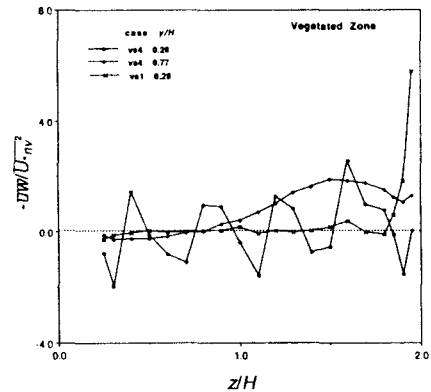


図-9 レイノルズ応力 $-\overline{uw}$ の横断方向分布

4. おわりに

本研究はファイバーレーザ流速計を用いて片側半幅が植生である開水路流れを全断面にわたり約1000測点にもおよぶ高精度な三次元計測をして、その乱流構造を実験結果に基づいて考察したものである。植生流れの数値計算手法としてNaotら(1996)⁸⁾は、最近、代数応力モデルを拡張した乱流モデルを提案している。このような計算モデルの構築・検証には高精度の実験データを要するので、今後さらなるデータの集積を行い乱流数値計算結果と比較検討する予定である。また、植生領域と非植生領域間で発生する大規模な組織渦構造をPTV等の流れの画像解析手法から今後解明してゆきたい。

参考文献

- 1) 辻本哲郎・北村忠紀(1994)：土木学会論文集, No.491/II-27, pp.61-70.
- 2) 福岡捷二・藤田光一・新井田浩(1992)：土木学会論文集, No.447/II-19, pp.17-24.
- 3) 棚津家久・富永晃宏・中川博次(1993)：土木学会論文集, No.467/II-23, pp.49-56.
- 4) Tominaga, A. and Nezu, I. (1991) : J. Hydraulic., ASCE, Vol.117, pp.21-41.
- 5) Nezu, I. (1996) : Flow Modeling and Turbulence Measurements, Balkema, pp.65-74.
- 6) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. (1994) : Proc of Hydraulic Eng., JSCE, vol.38, pp.437-442.
- 7) 棚津家久・阿部崇・志村拓也・中山忠暢(1995)：河道の水理と河川環境シンポジウム論文集, pp.45-52
- 8) Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. (1996) : J. Hydraulic Eng., ASCE, vol.122, No.11, pp.625-633.