

植生キャノピー開水路流れの乱流構造と ディスペルシブ効果に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON TURBULENCE STRUCTURE AND DISPERSIVE EFFECTS
IN VEGETATED CANOPY OPEN-CHANNEL FLOWS

禰津家久¹, 山上路生², 岡本隆明³
Iehisa Nezu, Michio Sanjou and Takaaki Okamoto

¹フェロー, 工博, 京都大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員, 博(工), 京都大学大学院助手, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³学生員, 京都大学 工学部地球工学科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

It is very important in river management and hydraulic engineering to investigate the hydrodynamic properties in vegetated open-channel flows. There are a lot of experimental and numerical studies on open-channel flows over vegetated canopies, in which velocity distributions are largely varied with not only vertical but also streamwise and spanwise directions. In particular, it is needed to reveal such dispersive properties of velocity components, because it is considered that the velocity dispersion has significant relations with turbulence transport and generation due to vegetations.

Therefore, in this study, turbulence measurements were conducted in vegetated canopy open-channel flows by using two-component laser Doppler anemometer, and turbulence structure and dispersive effects were revealed experimentally.

Key Words : *vegetated canopy open-channel flow, dispersive flux and turbulence measurement*

1. はじめに

河川に繁茂する植生は、流れの抵抗に大きな影響を及ぼす一方で、河川生態系の主要な構成要素であるから、開水路流れの水理乱流構造と植生の関係を詳細に解明することは、河川工学上、きわめて重要である。したがって、植生流れに関する研究は古くから多くの研究者によって行われてきた。その先駆的なものはKouwenら(1969)¹⁾の実験的研究である。彼らは開水路の底面に柔軟で短冊形状の植生模型を敷きつめ、ピトー管によって流速分布を求めた。またRaupachら(1979)²⁾は、地表における森林などの植生帯が大気流れに及ぼす影響を考察することを目的に、粗度風洞場を熱線流速計で乱流計測した。彼らは複数の円柱粗度の配置を変化させて計測位置による流速分布やレイノルズ応力分布の変化を調べた。

またわが国でも室田・福原(1983)³⁾は河川底に繁茂した藻類を想定して、絹糸を水路底部に設置した流れ場を計測して、揺動植生と水流間のエネルギーの輸送特性を考察した。清水ら(1991)⁴⁾も模擬植生実験をホットフィルム流速計を用いて行い、底面の植生層が浸透層とみなせる場合には植生層上の表面流れによって植生層内の乱流構造が支配されるとともに、植生層内と表層での運動量交換が水理構造に大きな

影響を与えることを報告している。さらに清水ら(1992)⁵⁾は上述の植生流れを計算流体力学的に再現するために、差分格子内で空間平均された運動方程式に、 k -モデルを適用した数値モデルを開発した。辻本(1992)⁶⁾は藻場を想定した模擬植生実験を行い、流れと浮遊砂輸送の関係を考察した。

また近年では組織渦に焦点をあてたものもある。池田ら(1995)⁷⁾は水理実験によって植生先端から発生する組織渦と植生の揺動特性について研究した。Nezu&Onitsuka(2001)⁸⁾は水路の片側に円柱状の模擬植生を設置した流れをLDAとPIVを用いて乱流計測し、平面渦の発生特性や流れとの相互作用について考察した。田村・灘岡(2002)⁹⁾は植生の揺動が流れに与える影響を画像計測によって考察した。

ところで、河床波流れや植生流れのような境界形状が空間変化する流れでは、流れ場を空間平均処理することがよく行われる¹⁰⁾。この操作によって3次元の流れ場を2次元的に捉えることができ、複雑な植生水理特性の把握がシンプルになる。この際に新たにdispersive-fluxと呼ばれる分散項が出現するが、これに3次元効果が集約されるので、乱れや物質輸送を支配する組織渦の挙動や抵抗特性を考察するためにはdispersive-fluxを正確に評価する必要がある。そこで本研究ではポリスチレン板とレゴブロックを

表-1 計測ケース

Case	Q (l/s)	Um (cm/s)	h (cm)	y_s (cm)	Re	Fr	U^* (m/s)
h075Fr10	1.67	8.2	7.5	5.0	6150	0.10	0.022
h110Fr10	4.00	11.6	11.0	5.0	12760	0.10	0.033
h150Fr10	6.05	12.0	15.0	5.0	18000	0.10	0.028
h200Fr10	9.85	14.0	20.0	5.0	28000	0.10	0.03
h110Fr06	2.20	6.4	11.0	5.0	7000	0.06	0.017
h110Fr17	6.00	17.4	11.0	5.0	19000	0.17	0.045
h110Fr22	8.00	23.2	11.0	5.0	25520	0.22	0.065

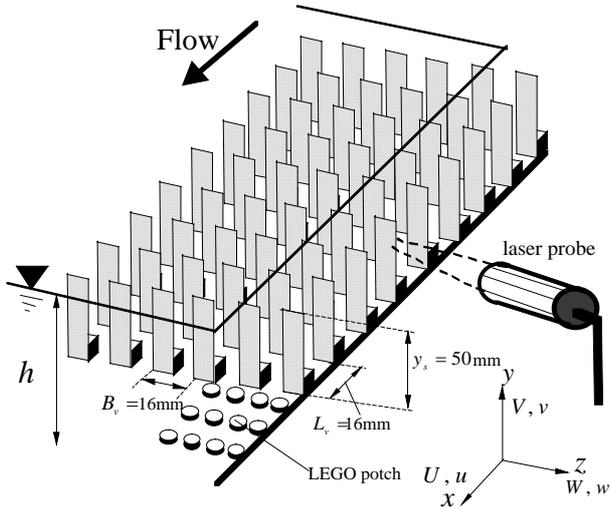


図-1 実験装置図

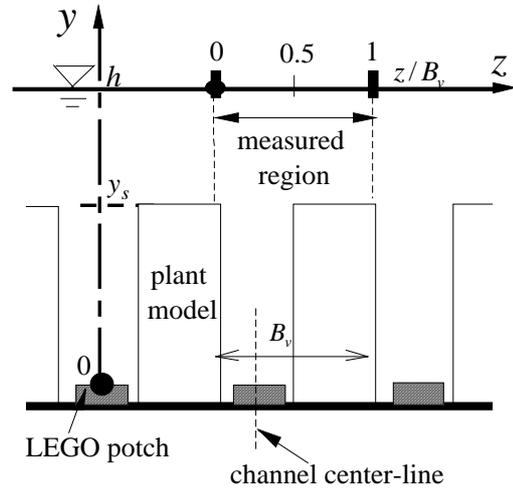


図-2 植生模型と横断方向計測位置

用いて植生模型を作成し、開水路植生流れを2成分レーザー流速計(LDA)によって乱流計測した。その結果、植生流れの時間平均流速分布や乱れ特性およびdispersive項の運動方程式への寄与率が明らかにされた。

2. 実験装置と計測方法

本実験の装置図を図-1に示す。水路は全長10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型水路である。 x, y および z はそれぞれ、流下方向、鉛直方向および横断方向である。 U, V および W は各方向における時間平均流速、 u, v および w はそれぞれ乱れ成分である。 h は水深、 y_s は植生の高さである。水路底面には、計測部を含めて6mの区間にわたって図-2で示すような植生模型を配置した。植生模型は沈水性の有茎植物をモデル化して、根幹部として1ポッチパーツのレゴブロックと、葉茎部として厚さ1mmの亚克力板から構成される。水路底面にレゴ用ベース板を敷き詰めて、その上に主流および横断方向にそれぞれ $L_x = B_x = 16$ mm間隔の格子状に植生模型を設置した。また鉛直方向の原点はレゴベースのポッチ高さに、横断方向原点は水路のセンターラインに存在する植生の真横にとった(図-2)。

流速計測には2成分のLDAを用いた。図-1に示すようにレーザー光を水路側方から植生間に照射して

キャノピー内部も計測した。

表-1は実験ケースを示す。水理条件は水深とフルード数を系統変化させて合計8ケースを設定した。ケース名は水深とフルード数を示しており、たとえばケースh075Fr10では水深7.5cm、フルード数0.10である。 U^* は摩擦速度で、次節で説明する。図-2に示すようにこれらのケースについては、キャノピー内の流速が比較的大きく浸透流的となる水路センターラインに存在する植生間の中心軸上を計測した。さらに横断方向の分散特性を調べるためにケースh150Fr10については、横断方向に計測位置をトラバースさせ、合計9つの鉛直ラインを計測した。

本研究では $x-z$ 平面の空間平均という概念を導入する。すなわちある水理量 Φ は次のように空間平均値 $\langle\Phi\rangle$ とその偏差 Φ'' から構成される。

$$\Phi \equiv \langle\Phi\rangle + \Phi'' \quad (1)$$

空間平均は正確には主流および横断方向について同時に行うものであるが、本研究では主流方向の分布変化は横断方向に比べて小さいものとして無視し、横断平均を空間平均と仮定した。

3. 実験結果と考察

(1) 植生キャノピー層内の時間平均流速分布

まず植生層内部の主流速分布に注目する。植生キ

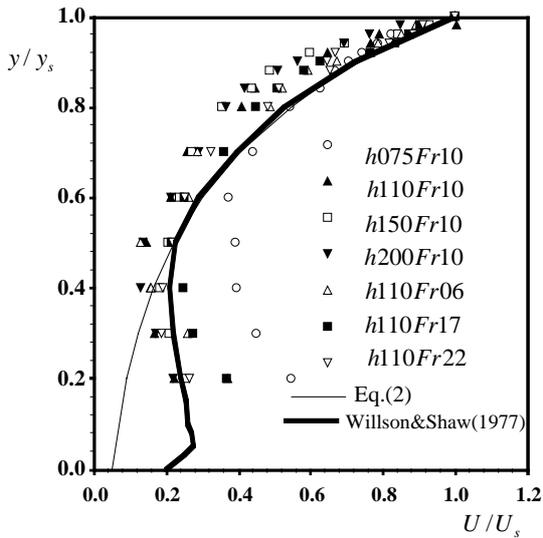


図-3 植生内層における主流速分布

キャノピー内部では植生の存在が流れに及ぼす影響が大きく、植生背後領域では流れが極めて小さくなる。ここでは流速がある程度存在する植生間の中央部の計測結果について考察する。植生内部領域においてはRaupach(1981)¹⁰⁾が1次の局所拡散モデルに基いた次式を報告している。 α は実験定数である。

$$U(y)/U(y_s) = \exp\{\alpha(y/y_s - 1)\} \quad (2)$$

図-3に植生キャノピー内 ($y/y_s < 1$)における時間平均流速分布を示す。比較のために式(2)と、2次モーメントを考慮したWillson&Shaw(1977)¹¹⁾の植生大気流れの計算曲線もプロットした。ここで式(2)の α は4とした。注目すべき点は、植生先端付近ではケース間の差が小さいが、底面に向かうにつれてその差が大きくなることである。特に植生外層領域が小さい水深 $h=7.5\text{cm}$ のケースでは底面近傍の無次元速度が大きい。これは植生先端のスリップ速度と底面付近の速度の差が小さいことを意味する。さらに注目すべきは、流速分布が凹型分布をもつことで流速の逆シアーが存在することである。さて式(1)の1次拡散モデルおよびWillson&Shawの結果は植生先端付近 ($y/y_s = 1$)では実験値ともよく一致するが、1次拡散モデルでは底面付近の逆シアーを再現することはできないことがわかる。

(2) 植生キャノピー層外の時間平均流速分布

ここでは植生キャノピーより上層部の主流速分布に注目する。まず横断方向の主流速分布を考察するために、図-4(a)および(b)にケースh150Fr10の主流速と鉛直流速分布を横断方向にプロットした。図の結果はそれぞれ各高さの横断平均値 $\langle U \rangle$ および $\langle V \rangle$ で無次元化した。主流速については植生層内

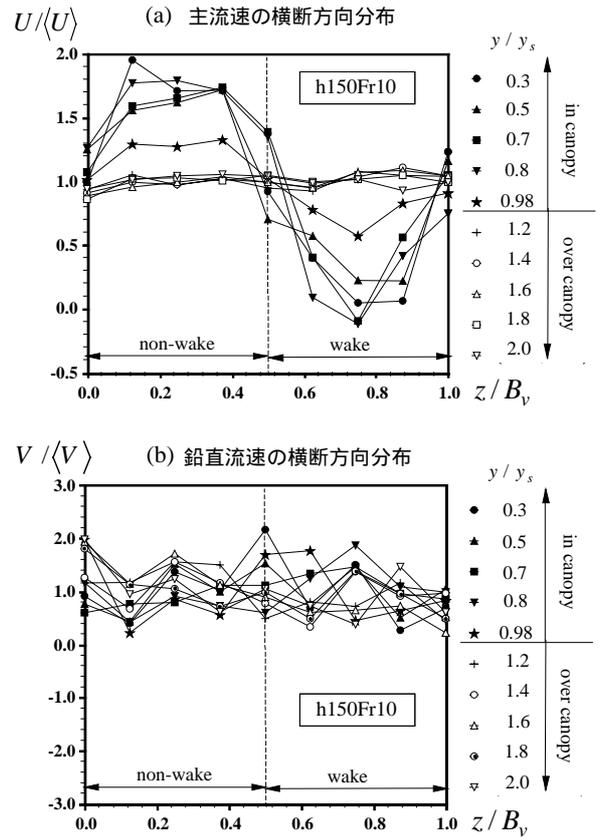


図-4 主流速および鉛直流速の横断方向分布

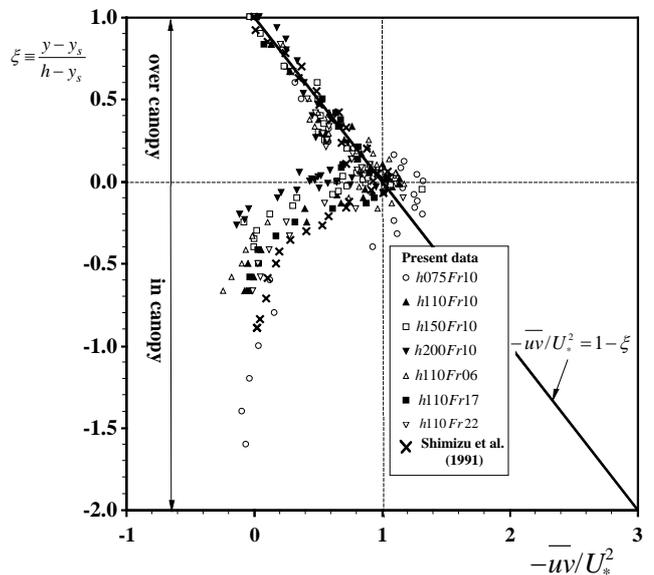


図-5 無次元レイノルズ応力分布

($y/y_s < 1$)では植生背後では流速が小さくなるため横断方向の変化が大きい。植生層外 ($y/y_s > 1$)では植生による流れの影響が小さいので主流速分布の横断変化は小さい。したがって植生上層領域では横断方向位置によらない普遍則が成立すると思われる。一方、鉛直流速に関しては全水深領域において注目すべき横断分布変化はみられない。

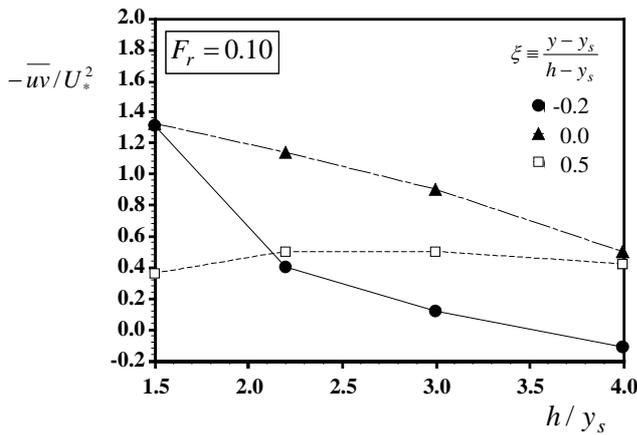


図-6 かぶり水深とレイノルズ応力の関係

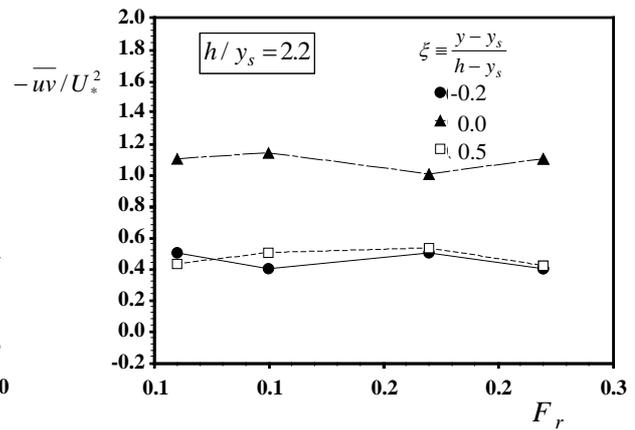


図-7 フルード数とレイノルズ応力の関係

Raupachら(1979)²⁾は円柱粗度の配置を系統変化させた空気流による実験結果を用いて、粗度外層において次の対数則が成立することを報告している。

$$(U - U(y_s))/U_* = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y-d}{y_s-d} \right) \quad (3)$$

ここで κ はカルマン定数で $\kappa=0.41$ であり、 d は原点移動量で流れ場によって決定される。また式(3)の摩擦速度 U_* は植生の影響が小さいと考えられるレイノルズ応力の外層領域での分布から評価できる。そこで式(3)の検証の前にレイノルズ応力分布の特性について考察する。図-5は植生間を計測した全水理ケースで得られたレイノルズ応力分布 $-uv$ を示したものである。横軸は水深に対する相対座標であり、 $\xi = (y - y_s)/(h - y_s) = 0$ が植生先端位置に対応する。比較のためにかぶり水深比が本研究に近い清水ら(1991)のホットフィルムによる計測結果($h/y_s = 2.06$)もプロットした。また式(4)で与えられる外層で成立するレイノルズ応力の線形分布式も併示した。

$$-\overline{uv}/U_*^2 = 1 - (y - y_s)/(h - y_s) \quad (4)$$

植生先端付近から内層にかけてはケース間での計測結果に大きな差があるが、水面付近の外層領域の $(y - y_s)/(h - y_s) > 0.5$ では、主流速分布と同様にケース間の差異は小さいことがわかる。この結果から全てのケースにおいて摩擦速度が正確に評価できることがわかる。図-6は同一のフルード数($Fr = 0.1$)のもとにおける $\xi = -0.2, 0.0$ および 0.5 位置での相対水深とレイノルズ応力値をかぶり水深 h/y_s に対してプロットした。かぶり水深の増加とともに $\xi < 0$ のキャノピー内部の計測高さで、 $-\overline{uv}$ が減少する。一方で $\xi > 0$ の植生上部領域ではその変化が小さい。図-7は同様に同一のかぶり水深条件($h/y_s = 2.2$)におけるフルード数とレイノルズ応力の関係を示す。この結果から植生層の内外ともにフルード数による $-\overline{uv}$ の変化は小さいことがわかる。図-6および図-7の結

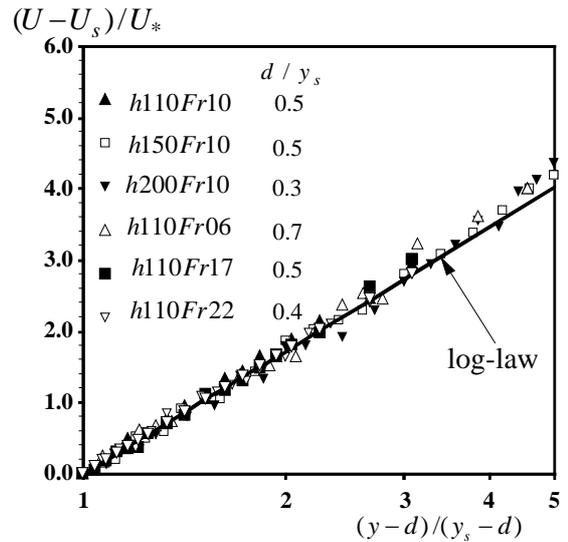


図-8 植生層外における主流速分布

果よりレイノルズ応力分布はフルード数よりもかぶり水深によって大きな影響を受けることがわかる。

このようにしてレイノルズ応力分布より求めた摩擦速度 U_* を用いて平均流速を無次元化し、式(3)と比較する。図-8は各水理ケースにおける平均流速 U の鉛直分布を植生外層についてプロットしたものである。この図から原点移動量の d 値はケースによって変化するが、いずれも植生先端部付近を中心に式(3)に一致することがわかり、植生外層では対数則が成立することがわかる。

(3)組織乱流構造に関する考察

図-5のレイノルズ応力分布から植生先端付近では流速シアにともなう大きな組織渦が発生し、植生層外の高速流と層内の低速流の運動量が交換されることが推測される。これを考察するために次式で定義される瞬間レイノルズ応力の条件付4象限区分解析¹²⁾を行った。

$$RS_i = (\overline{uv})^{-1} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T uv I_i dt \quad (i=1,2,3,4) \quad (5)$$

ここで, (u, v) が i 象限に存在するとき, I_i は 1, それ以外は 0 となる. なお, これらの各象限は次の現象に対応している.

- $i=1$ ($u > 0, v > 0$) : outward interaction
- $i=2$ ($u < 0, v > 0$) : ejection
- $i=3$ ($u < 0, v < 0$) : inward interaction
- $i=4$ ($u > 0, v < 0$) : sweep

特に重要なことは, ejectionによって低速流体が巻き上がり, sweepによって高速流体が下降することであり, これらは組織乱流渦によって引き起こされる.

図-9は植生間中心軸を計測したケースh110Fr22における条件付レイノルズ応力 RS_i の鉛直分布を示したものである. 本結果より, 植生先端の $\xi = 0$ を中心に, RS_2 および RS_4 が RS_1 および RS_3 に比べて卓越しており, 組織渦による植生層内外の運動量交換が行われていることがわかる. また植生先端付近では $RS_4 > RS_2$ であり, sweepの寄与がejectionよりも大きく植生層上の高速流体が頻繁にキャノピー内部に輸送されることが示唆される. またこの傾向は他の水理ケースでも確認できた. 清水ら⁴⁾の研究でも同様の結果が報告されており, 開水路植生流れに特有の乱流構造であるといえる.

既往研究¹⁰⁾によってsweepおよびejectionがスキューネスと大きな関係があることが指摘されている. 瞬間流速の3次相関であるスキューネスについて考察する. 主流方向と鉛直方向のスキューネス S_u および S_v はそれぞれ次式で定義される.

$$S_u \equiv \overline{u^3} / u'^3, \quad S_v \equiv \overline{v^3} / v'^3 \quad (6)$$

図-10はケースh110Fr22における S_u , S_v および組織渦の寄与を示す $\Delta RS \equiv RS_4 - RS_2$ の鉛直分布をプロットしたものである. S_u と S_v は異符号となるが, どちらの絶対値も植生先端からキャノピー内部に向かって増加して, 植生内層でピークをもつ. このことはガウス分布からのずれを意味しており, 組織的な変動の存在を示している. ΔRS も同様の分布傾向を示しており, 乱れの3次相関は, 植生開水路流れの乱流輸送に大きく寄与することがわかる.

(4) Dispersive効果に関する考察

図-4(a)の主流速分布の横断変化からわかるように植生層外では水理構造が横断方向にほぼ均一とみなせる一方で, 植生層内では植生によって流れは空間的に非均一なものとなる. 本節では, 運動方程式およびレイノルズ応力方程式における空間分散を表す dispersive効果について考察する.

Raupach&Thom¹⁰⁾は運動方程式を水平面で空間平均して, 定常および鉛直2次元近似を行い, 次式を

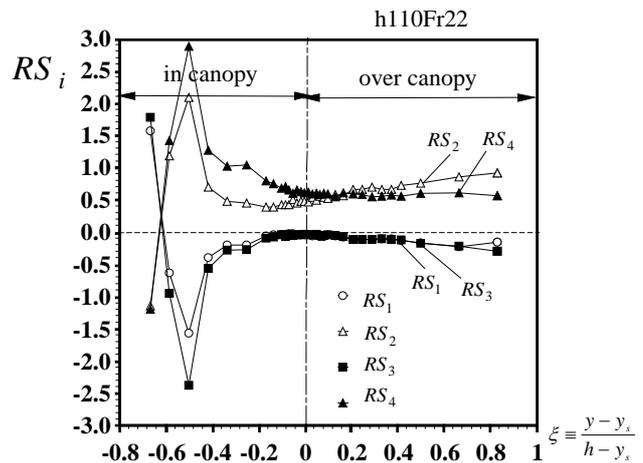


図-9 4象限区分解析結果

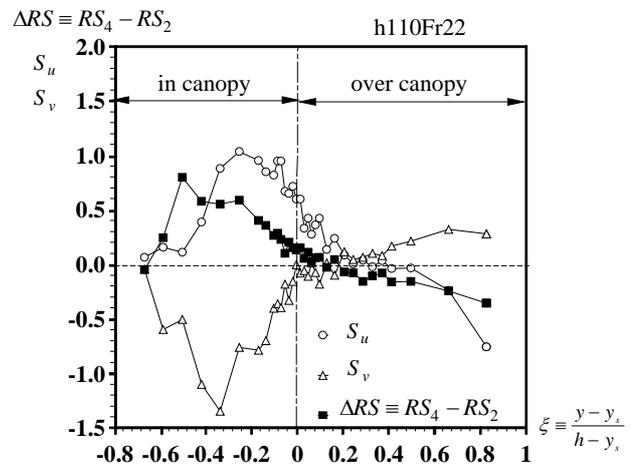


図-10 スキューネス分布

導いている.

$$\frac{\partial}{\partial y} \langle U''V'' \rangle + \frac{\partial}{\partial y} \langle \overline{uv} \rangle = -\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial P''}{\partial x} \right\rangle + \nu \langle \nabla^2 U'' \rangle + g \sin \theta \quad (7)$$

ここで P は圧力である. 左辺第1項は空間平均によって現れた dispersive項である. 右辺はそれぞれ, 圧力勾配項, 粘性項および重力項である. 式(7)より,

$$\frac{\partial}{\partial y} \langle U''V'' \rangle + \frac{\partial}{\partial y} \langle \overline{uv} \rangle - g \sin \theta \cong f_D + f_V \quad (8)$$

がえられる. すなわち dispersive項とレイノルズ応力項から重力項を差し引いたものは, 流体の抗力 f_D および粘性応力 f_V に等しくなる. そこで図-11に h150Fr10における dispersive項, レイノルズ応力項およびそれらの和の鉛直分布を比較する. この結果より dispersive項のピーク絶対値はレイノルズ応力項の30%ほどの値をもち流体力を評価する上では無視できない大きさであることがわかる. また図-4より植生界面付近における dispersive項の卓越は, 鉛直流速よりも主流速成分の横断変化による影響が大きいと思われる.

次にレイノルズ応力の方程式を空間平均すると式

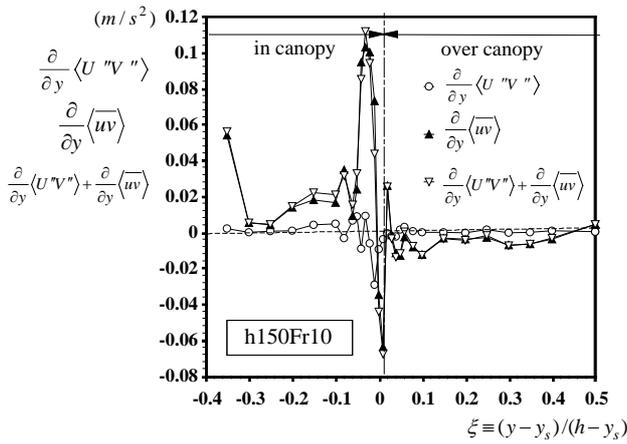


図-11 運動方程式におけるDispersive項とレイノルズ応力項の比較

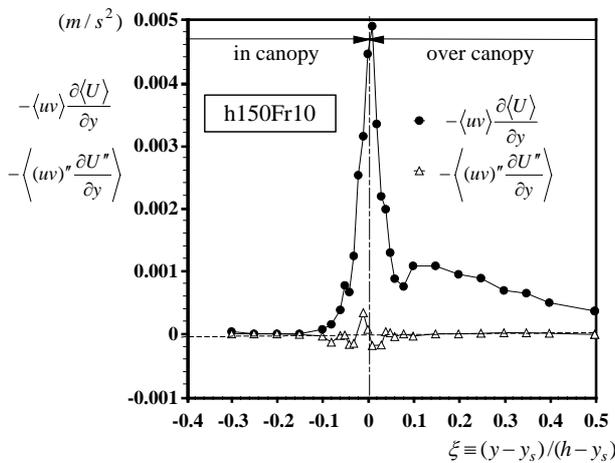


図-12 乱れの生成におけるdispersive効果

(9)が得られる。

$$0 = -\langle uv \rangle \frac{\partial \langle U \rangle}{\partial y} - \left\langle \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right\rangle - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\langle pv \rangle}{\rho} + \frac{1}{2} \langle \overline{vu_i u_i} \rangle + \frac{1}{2} \langle \overline{v u_i u_i} \rangle \right) - \langle \varepsilon \rangle \quad (9)$$

右辺1項と2項はいずれも乱れの生成項に関するもので、第1項は通常の流速シアによる生成項(shear-production)、第2項は流速成分の分散効果による生成項(wake-production)である。ここでは簡単のために第2項は $\left\langle \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right\rangle \cong \left\langle \overline{uv} \frac{\partial U}{\partial y} \right\rangle$ とした。

図-12にこれらの鉛直分布を示す。全体的にwake-productionは小さいが、両項ともに植生先端の $\xi = 0$ 付近でピーク値をもち、乱れの生成が最大であることがわかる。層外の $\xi > 0$ では、shear-productionは正值をもつが、wake-productionは流れが横断方向に一様化されるためにその値はほぼゼロとなる。したがって植生層外の領域についてはshear-productionのみ考慮すればよいことがわかる。

4. 結論

本研究では、植生開水路流れ対象にLDA計測し、主に乱流構造と分散特性を考察したものである。以下にまとめを示す。

- 1) 植生層の内外における流速分布を既往研究と比較した。植生層内においては横断変化が大きい、植生層外では一様化される。
- 2) その結果、植生層外におけるレイノルズ応力分布から摩擦速度が良好に算出できた。
- 3) 乱れの4象限区分解析を行い、植生層外の高速度流体が層内に輸送されることが確認できた。
- 4) 運動方程式および乱れ輸送方程式における分散項の鉛直分布を算出して、植生流れにおけるdispersive効果を明らかにした。

参考文献

- 1) Kouwen, N., Unny, T.E. and Hill, H.M.: Flow Retardance in Vegetated Channels, *J. of the Irrigation and Drainage Division*, pp. 329-342, 1969.
- 2) Raupach, M.R., Thom, A.S. and Edwards, I.: A Wind-Tunnel Study of Turbulent Flow close to Regularly Arrayed Rough Surface, *Boundary Layer Meteorology*, pp. 373-393, 1979.
- 3) 室田明・福原輝幸：水生植物を有する開水路流れの乱流構造に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第338号，pp.97-103，1983。
- 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，第438号，pp.31-40，1991。
- 5) 清水義彦・辻本哲郎・中川博次：直立性植生層を伴う流れ場の数値計算に関する研究，土木学会論文集，No.447 / -19，pp.35-44，1992。
- 6) 辻本剛三：藻場が存在する場における流れと浮遊砂輸送，海岸工学論文集，第39巻，pp.276-280，1992。
- 7) 池田駿介・金沢稔・太田賢一：可撓性を有する沈水性植生上の組織渦の三次元構造と穂波の生成，土木学会論文集，No.515 / -31，pp.33-43，1995。
- 8) Nezu, I and Onitsuka, K: Turbulence Structures in Partly Vegetated Open-channel Flows with LDA and PIV measurements, *J. of Hydraulic Res.*, Vol.39, pp.629-642, 2001.
- 9) 田村仁・灘岡和夫：可撓性に着目した藻場キャノピー周辺の流動・乱流構造に関する実験的研究，海岸工学論文集，第49巻，pp.341-345，2002。
- 10) Raupach, M. R. and Thom, A.S.: Turbulence in and above Plant Canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.13, pp.97-129, 1981.
- 11) Wilson, N.R. and Shaw, R. H.: A Higher Order Closure Model for Canopy Flow, *J. of Applied Meteorology*, Vol.16, pp.1197-1205, 1977.
- 12) Nezu, I and Nakagawa, H. Turbulence in Open-channel Flows, *IAHR monograph*, Balkema, 1993.

(2005.9.30受付)