

風波・植生開水路流れの組織乱流構造に関する実験的研究

Experimental studies on coherent turbulence structures in vegetated canopy open-channel flow with wind-induced water-waves

瀬津家久*, 山上路生**, 岡本隆明***

Iehisa Nezu, Michio Sanjou and Takaaki Okamoto

*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 (〒615-8540 京都市西京区桂キャンパス)

**正会員, 博(工) 京都大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

***学生員, 京都大学大学院修士課程, 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

Environmental problems about aquatic plants are now increasing in actual rivers. Coherent turbulence events such as ejections and sweeps are generated by the shear instability near the boundary between above-canopy layer and within-canopy layer. When wind-induced water-waves appear on the free-surface flows, a large amount of oxygen gas may be transported toward the vegetation layer, and it is inferred that the mass and momentum exchanges are promoted significantly by the coherent motions. It is thus very important in river environment to investigate these turbulence structure and coherent motions in such flows. In this study, we conducted turbulence measurements by using a high-speed PIV technique. It was found from time-averaged velocity profiles that some wave effects appear even in the canopy layer. The correlation analysis was also conducted in order to examine turbulence transport process promoted by the wind-induced air/water interface. Furthermore, relation between the coherent event and waves were revealed on the basis of the present PIV data.

Key Words: vegetation, wind-induced water waves, turbulence, PIV

1. はじめに

実河川の植生群落は, 抵抗増加ともなう水位上昇という治水上のマイナス面から伐採されてきた。しかし最近では, 水辺植生の水生生物環境の創造, 河床侵食の防止といった河川環境上のプラス面が評価され, 植生帯を保全する動きが高まってきた。植生域では植生抵抗によって流速分布が低減し, 植生域と非植生域との境界部においてせん断不安定性により大規模な組織乱流渦が発生して, 流れ場に大きな影響を与えると同時に乱流拡散が促進されることが解明されつつある。このため国内外において, 水工学のみならず気象学や農学分野でも植生キャノピーを対象とした流体力学的研究が数多く行われてきた。Raupach ら(1979)¹⁾, (1981)²⁾は, 穀物畑上の大気乱流の特性に注目した。彼らはホットワイヤー流速計を用いて風洞実験を行い, 植生をモデル化した円柱粗度の配置と計測位置を変えて ejection および sweep の挙動, 乱れエネルギーの収支関係について考察した。清水ら(1991)³⁾はホットフィルム流速計を用いた水路実験によって, 非水没植生で植生密度が大きい場合は流速分布は一様になり, 表面流れによって植生層内の境界部にせん断乱流場が形成されることを示した。辻本ら(1998)⁴⁾は柔軟な植生の揺動効果が流れ構造に与える

影響について調べ, 平均流エネルギーの一部が植生の揺動エネルギーや摩擦力に移行することを示した。Nepf ら(2000)⁵⁾は超音波流速計(ADV)とレーザー流速計(LDA)を用いて, 水深を系統変化させて植生開水路流れを乱流計測し, 植生高さに対するかぶり水深と流速シアによる乱れの生成項(shear production)と植生の分散効果による乱れの生成項(wake production)の相対的な寄与の大きさの関係を明らかにした。Poggi ら(2004)⁶⁾はLDAによって植生開水路流れを乱流計測し, 植生素素によって発生するカルマン渦列による小さな渦の影響が大きい下層, せん断不安定になって K-H 波が発生する植生先端部を含む中層および境界層のような特性がみられる上層の3層に分類した。

一方で, 実河川では様々な規模の風波が観察される。風波が引き起こされると, 水/空気界面での物質や運動量が交換され, さらに酸素や炭酸ガスなどの水層への輸送が促進される。特に温暖化問題, 溶存酸素濃度など環境問題で重要視される気体は低溶解性のものが多く, 水層での輸送速度がガスフラックスを決定する。風波に関する研究は海岸・海洋工学や河川工学など多くの分野で行われている。Kawai(1982)⁷⁾は風波乱流場の空気層を可視化し, 空気層界面での組織運動について考察した。加藤ら(2000)⁸⁾は PTV

表 - 1 水理条件

case	water flow							air flow	
	Q (l/s)	U_m (cm/s)	H (cm)	h (cm)	Re	Fr	λ	$U_{a\ max}$ (cm/s)	界面条件
w0H9.5	4.40	11.5	9.5	5.0	11000	0.10	0.38	0.0	無風
w7H9.5	4.40	11.5	9.5	5.0	11000	0.10	0.38	7.0	2次元重力波
w0H15	6.05	10.0	15.0	5.0	15000	0.10	0.38	0.0	無風
w7H15	6.05	10.0	15.0	5.0	15000	0.10	0.38	7.0	2次元重力波

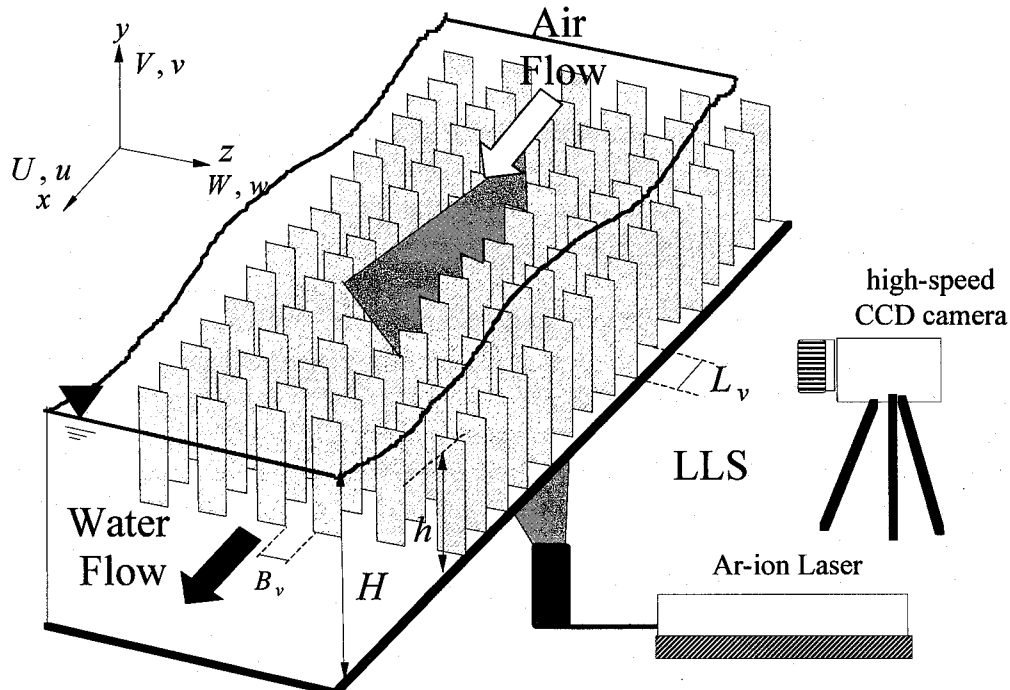


図-1 PIV 計測システム

を用いて波のトラフレベルより上の高さを含めた水面付近での流速の測定を行い、吹送流を解析した。竹原ら(2002)⁹⁾は風波乱流場の水層と空気層を PTV を用いて同時計測し、水表面の極近傍の流れ構造を解明した。杉原ら(2002)¹⁰⁾ はは風速だけではなく波面の状態にも着目して、理論的考察と風洞実験から気液界面でのガス輸送係数 k_L の実験式を導いた。

実河川には前述したように河床に多種多様の水生植物が繁茂しており、河川生態系の重要な構成要素となっている。河川植生にとって必要不可欠な酸素ガスの水層への吸収は風波によって促進されるため、風波植生混成流における乱流構造を解明することは重要である。

昨年度、瀬津ら(2006)¹¹⁾は風波が発生する植生開水路流れを LDA によって計測し、その基礎水理特性を考察した。しかしながらポイント計測だけでは組織乱流構造の抽出は不十分である。そこで本研究では高速度カメラによる画像計測を行い PIV より多点データを解析して風波植生流れの乱流特性や組織構造を明らかにする。

2. 実験装置と計測方法

図-1 に本研究の PIV 計測システムを示す。実験装置は全長 16m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型開水路風洞装置であり、前報と同様である¹¹⁾。図のように水路底面に高さ 50mm、幅 8mm、厚さ 1mm の短冊状の植生模型を正方格子状に配置した。流下方向の植生の配置間隔 L_v は 2.4cm、横断方向の間隔 B_v も 2.4cm である。植生模型はアクリル製で、カナダモなどの沈水性の有茎藻類を単純にモデル化したもので、水流による変形は考えないものとする。

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の座標軸である。 U, V および W は各方向における時間平均流速成分、 u, v および w はそれぞれ瞬間流速の時間平均流速からの偏差すなわち乱れ変動成分を示す。 H は静水時の全水深、 h は植生の高さである。計測は風波が十分に発達していると考えられる水路上流端より約 7m 下流で行われた。水路下流端には消波板を設置し波の反射による流体の振動乱れを抑制した。なお流下方向座標 x の原点 $x = 0$ は撮影範囲内にある植生要素の位置とした。

可視化撮影の光源として 2W の連続 Ar イオンレーザを

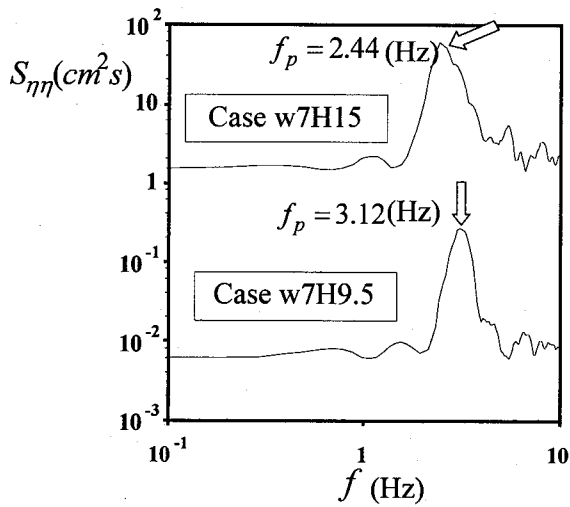


図-2 水面変位のパワースペクトル

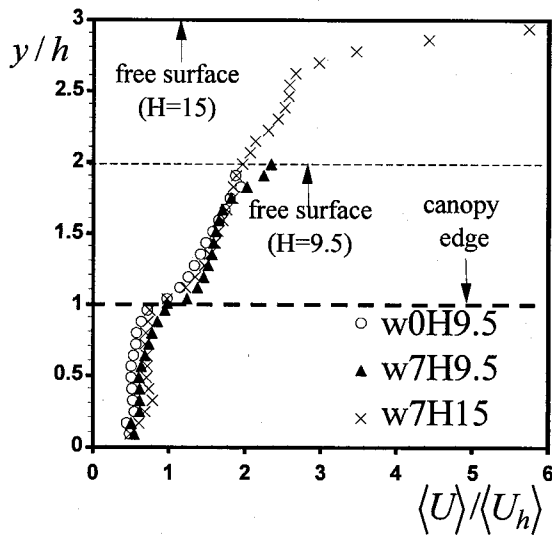


図-3 水層の主流速鉛直分布

用いる。自由水面での乱反射を防ぐため、図のように水路下方からシリンダリカルレンズを通して厚さ 2mm のレーザライトシート(LLS)を照射した。この x - y 平面を水路側方から高速度 CMOS カメラでデジタル撮影した。トレーサには粒径 $100\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のポリスチレン粒子を用いた。カメラに 50Hz の外部信号を与えて、それをトリガーにして 500Hz のフレームレートで 2 枚の連続画像のペアを 30 秒間計測した。すなわち PIV 解析に用いる 2 枚の画像の時刻差は $1/500\text{s}$ 、瞬間流速ベクトル $(\vec{u}, \vec{v})$ のサンプリング間隔は $1/50\text{s}$ である。LLS の横断方向の入射位置は植生要素間 (non-wake 面) ¹¹⁾とした。また風波の影響で発生する水面変動を調べるために容量式波高計で水面変位を計測した。

表-1 に水理条件を示す。ケース名は最大風速と全水深を示しており、たとえばケース w7H15 は最大風速 $U_{a,\text{max}} = 7.0 (\text{m/s})$ 、全水深 15cm である。全ケースにお

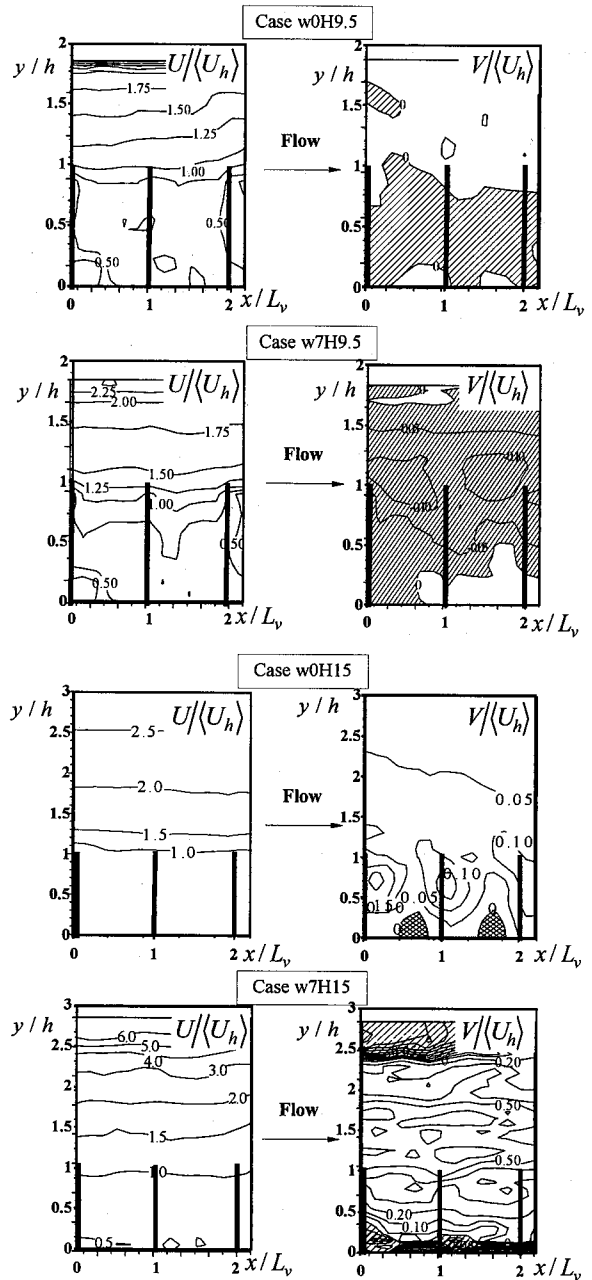


図-4 水層主流速の縦断面コンター

いてレイノルズ数 $Re = U_m H / \nu$ 、フルード数 $Fr = U_m / \sqrt{gH}$ および植生密度 λ は一定にした。本実験では全水深と最大風速をそれぞれ 2 通りに変化させ、計 4 ケースの水理計測を行った。既往研究 ¹¹⁾によって植生の影響が及ぶ領域は植生高さの 2 倍程度であることが知られているため、本実験ケースの全水深は既往研究 ¹¹⁾と同じケースと植生高さの約 2 倍 ($H/h = 1.9$) に設定した。

植生密度 λ は単位面積当たりの植生の前面遮蔽面積 (frontal area) で定義され、次式で算出した。

$$\lambda = nA/S \quad (1)$$

ここで S は基準面積、 n は面積 S の領域上に存在する植

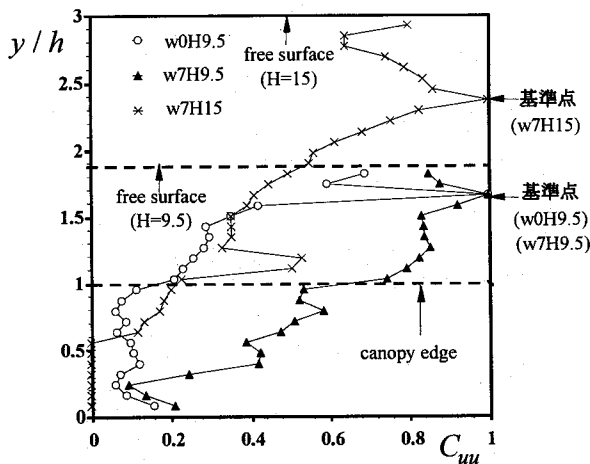


図-5 主流速の空間相関の鉛直分布

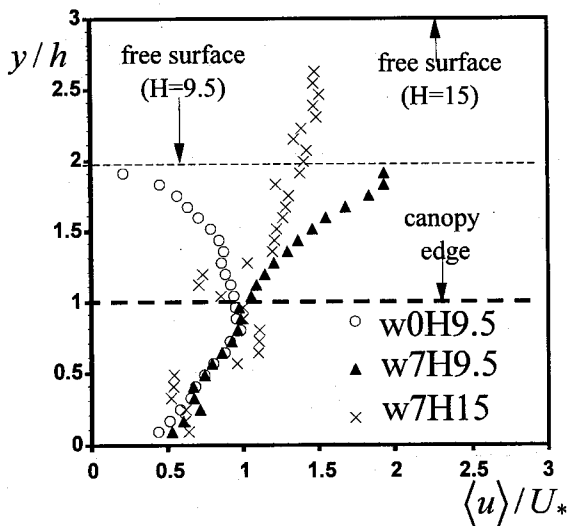


図-6 乱れ強度分布の比較

生要素の総数, A は植生の流れに垂直な投影面積である。

3. 実験結果と考察

3.1 風波の特性について

図-2 は風波と植生の混成場のケース w7H9.5 と w7H15 の水面変動から求めた周波数パワースペクトル密度 $S_{\eta\eta}$ を示したものである。ただし, w7H15 のデータは上方に 10^2 だけ平行移動して図示した。両ケースとも $1 \sim 10\text{Hz}$ において明確な卓越周波数 f_p がみられる。ケース w7H9.5 の有義波高および有義周期はそれぞれ 0.51cm , 0.32s , w7H15 の有義波高および有義周期はそれぞれ 0.77cm , 0.41s であった。目視で確認した状況では PIV 計測点前後ほぼ全域において 2 次元重力波となっていた。

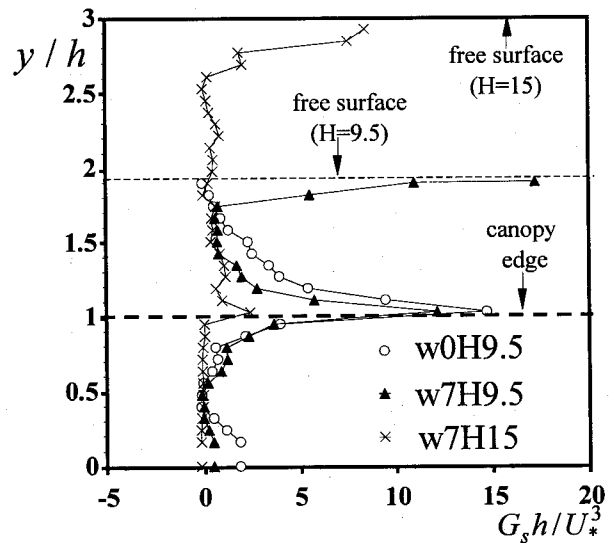


図-7 乱れの発生率

3.2 平均流特性

図-3 は 3 ケースについて流下方向に空間平均した水層主流速分布を比較したものである。結果は植生層内部と植生層外部での流速の比較を行うために植生先端 ($y/h = 1$) での主流速の流下方向平均値 $\langle U_h \rangle$ で無次元化している。なお, $\langle \rangle$ は流下方向空間平均を表す。まず無風植生場のケース w0H9.5 と風波・植生混成場のケース w7H9.5 を比較すると, 風波界面から植生先端付近, 植生層内部でケース w0H9.5 よりケース w7H9.5 の主流速が大きくなっている。これより風波の影響が植生層内部の領域にまで及んでいると考えられる。ケース w7H15 では水・空気界面近傍において風波の影響で主流速が急激に増大している。

図-4 に 4 ケースについて時間平均した主流速と鉛直流速の縦断面 (x - y 平面) 分布を植生先端主流速の流下方向平均値 $\langle U_h \rangle$ で無次元化して比較したものである (斜線部は負値分布を示す)。ただし風波によって水面変動が発生すると, 水面付近ではトレーサー粒子の追跡が行えなくなり PIV や LDA による乱流計測は困難となるために図-4 は全水深から有義波高を引いた領域についてのみ示している。ケース w0H9.5 と比較してケース w7H9.5 では主流速 U は植生先端から水面近傍にかけて大きくなっている。ケース w0H9.5 では植生層内部で鉛直流速が負になっているのに対し, w7H9.5 ではほぼ全域で鉛直流速 V が負になっている。これは w0H9.5 では植生先端付近で発生する高速流の下降ベクトルである sweep が植生層内部にまで入り込み, ケース w7H9.5 ではこれに加えて風波の影響で界面近傍において強い大規模な下降流 (down burst) が発生しているためと考えられ, 注目される。down burst の発生は染料実験による目視からも確認できた。ケース w0H15 とケース

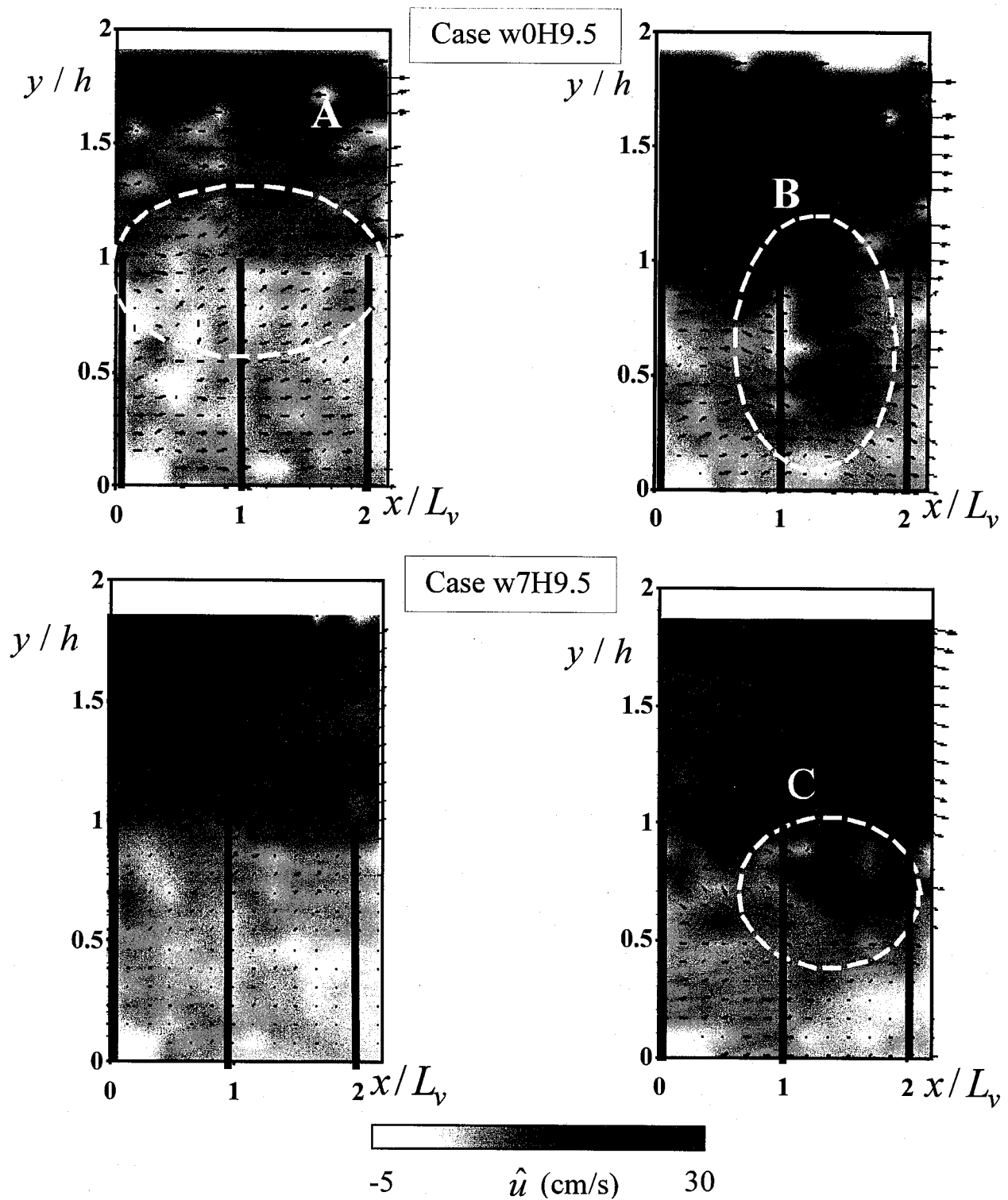


図-8 瞬間ベクトル分布

w7H15 を比較しても同様のことがいえるが、ケース w7H15 では down burst によって鉛直流速が負になる領域は水面近傍に限られるようである。H=15cm のケースに比べ、H=9.5cm のケースで鉛直流速が負になる領域が大きくなるのはかぶり水深が小さくなると組織構造のスケールが小さくなり、sweep の発生頻度が増えたためと推測される。

図-5 は 3 ケースについて植生要素の直上における水面付近の点 ($y/H = 0.8$) を基準点とした主流速の空間相関係数 C_{uu} の鉛直分布を示したものである。 C_{uu} は次式で表される。

$$C_{uu}(\Delta y) = \frac{\overline{u(x_0, y_0, z_0)u(x_0, y_0 + \Delta y, z_0)}}{\overline{u'(x_0, y_0, z_0)u'(x_0, y_0 + \Delta y, z_0)}} \quad (2)$$

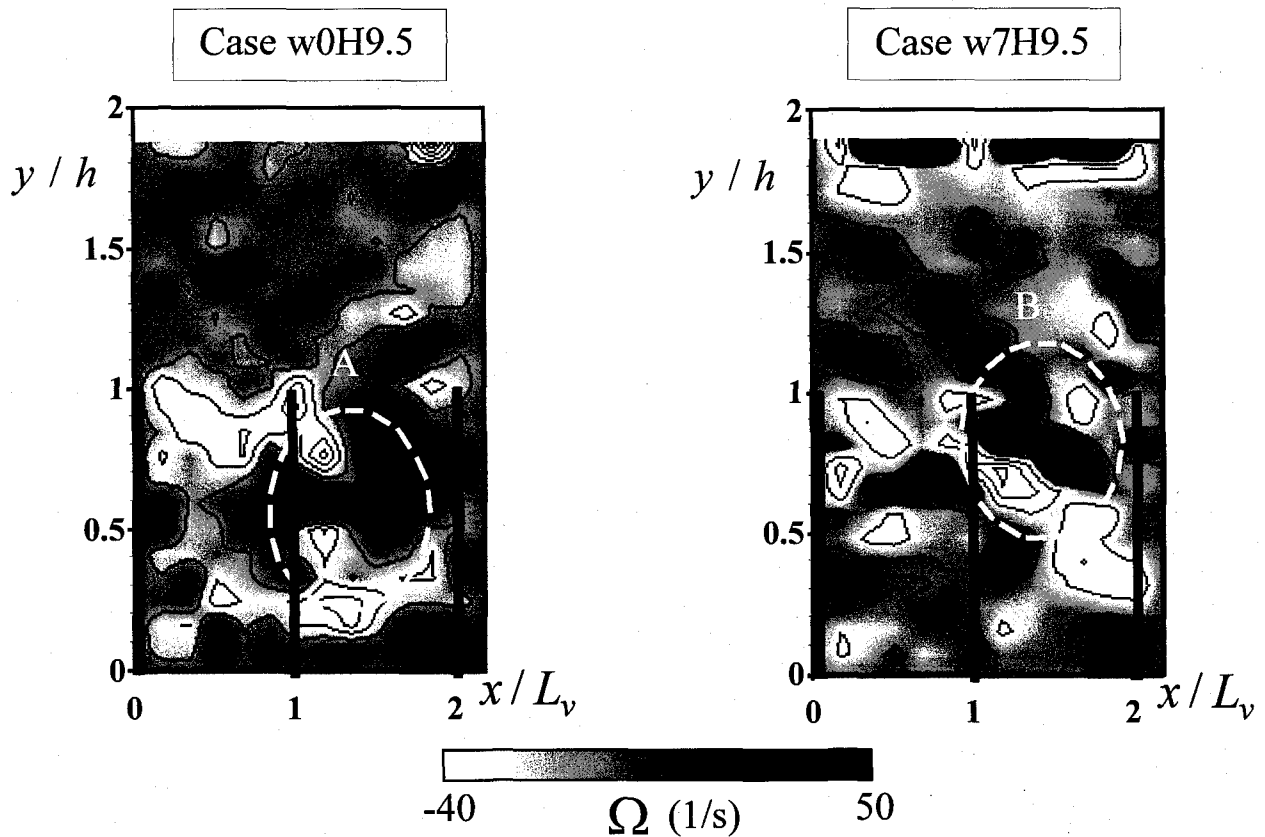


図-9 瞬間渦度分布

ここで (x_0, y_0, z_0) は基準点, Δy は基準点からの移動量である. ケース w0H9.5 では植生先端に向かって減少し, 植生層内部で急激に減少している. これは植生層内部で主流速が植生のシェルター効果により低減するためだと考えられる. w7H9.5 では基準点から植生先端付近まで大きな相関がみられ, 植生層内部でもケース w0H9.5 よりも相関が大きくなっている. これは風波・植生混成場では down burst によってより多くの運動量が植生層内部に輸送されることを示唆している. w7H15 では基準点から植生先端に向かって減少するが, 植生先端でピークをもつ. このことから気液界面による down burst と植生先端の sweep/ejection の間には重要な関係性があることが示唆される.

3.3 乱れ特性

図-6 に流下方向に空間平均した主流方向の乱れ強度 $\langle u \rangle$ の鉛直方向分布をプロットした. 乱れ強度 $\langle u \rangle$ は摩擦速度 U_* で無次元化している. ここで摩擦速度 U_* は既往研究¹¹⁾と同様に各ケースの無次元レイノルズ応力分布 $\langle -uv \rangle / U_*^2$ のピーク値が1となる値を採用した. ケース w0H9.5 と w7H9.5 でも植生層内部の下層ではほぼ同じ挙動を示すが, ケース w7H9.5 において植生先端から界面近傍にかけて風波による水面変動にともなって乱れ強度が

増大している. ケース w7H15 では水面近傍で乱れ強度が増加している.

図-7 は3ケースにおける流速シアによる乱れの発生率 G_s の鉛直分布を比較したものである. 流速シアに起因する生成項(shear-production) G_s は次式で定義され, 植生高さ h と摩擦速度 U_* で無次元化している.

$$G_s = -\langle uv \rangle \frac{\partial \langle U \rangle}{\partial y} \quad (3)$$

ケース w0H9.5 と w7H9.5 はともに植生先端付近で G_s がピーク値をもっている. 特にw7H9.5では風波による界面シアに対応して界面近傍で G_s が増加している. ケース w7H15 でもw7H9.5と同様に植生先端でピークをもち, 界面近傍で増加しているが, 植生先端でのピーク値はw7H9.5の方が大きくなっている. これは植生先端での流速シアがw7H9.5の方が大きいと考えられる.

3.3 組織乱流構造の瞬間特性

図-8 はケース w0H9.5 と w7H9.5 における瞬間流速ベクトル分布 $(\tilde{u}, \tilde{v})$ の一例を示したものである. コンターは瞬間主流速 $\tilde{u}$ の分布である. ケース w0H9.5 に関して左図では植生先端付近から植生層外部にかけて低速流の上昇ベクトル ejection(図中の破線で囲んだA)が発生している. ケース w0H9.5 右図では植生先端付近で高速流を植生内部に

輸送する下降ベクトル sweep(図中 B)が発生している。これは他の時刻での瞬間ベクトル分布にもみられ、無風状態の植生場には植生先端付近において sweep と ejection が交互に発生するような変動サイクルが存在することがわかった。このことは既往研究でも報告されている¹²⁾。

これに対し風波と植生の混成するケース w7H9.5 では、風波による水面変動に伴って左図で大規模な上昇流、右図で大規模な下降流の組織構造(down burst)が発生している。また w7H9.5 右図において down burst が植生層内部にまで入り込んでおり、植生層内部においてケース w0H9.5 よりも高速流体が輸送される様子が顕著である(図中 C)。これにより風波界面で発生する down burst の影響は植生先端付近にまで及んでいることがわかる。

3.4 瞬間渦度特性

図-9 はそれぞれ図-8 のケース w0H9.5 右図, w7H9.5 右図と同時刻における瞬間渦度分布を示したものである。渦度は次式で定義される。

$$\Omega \equiv \partial \tilde{u} / \partial y - \partial \tilde{v} / \partial x \quad (4)$$

ケース w0H9.5 では植生層内部において局所的に大きな正值分布(図中 A)が見られ sweep の発生とともに組織渦が植生層内部にまで入り込んでいる。ケース w7H9.5 では風波界面と図中 B の部分に局所的に大きな正值分布が見られる。特に図中 B の植生層内部の渦度分布は風波界面で発生する down burst が植生層内部に入り込んでいるためケース w0H9.5 と比べて大きな正值分布を持っている。

3.4 スペクトル特性

図-10 は ケース w0H9.5 と w7H9.5 について主流速の流速成分 $\tilde{u}$ から求めたパワースペクトル S_u を鉛直方向に比較したものである。パワースペクトル S_u は周波数 f と乱れ強度 $\langle u \rangle$ で無次元化している。また図中には慣性小領域における Kolmogoroff の $-5/3$ 乗則 (ここでは周波数 f をかけているため $-2/3$ 乗則となる) も併示した。ケース w0H9.5 では $y/h = 0.5$ および 1.0 において図中の黒矢印の部分でピーク値が現れており、これは植生流れの sweep, ejection による組織的変動の影響だと推測される。植生流れの周期的な渦によるスペクトルのピーク特性については Poggi ら⁹⁾も報告している。また植生層内部の点 $y/h = 0.5$ で高周波成分が大きくなっている(図中破線部)。これは植生層内部ではより小スケールの渦が多数生成するものと思われる。ケース w7H9.5 では全ての点において白矢印の部分で

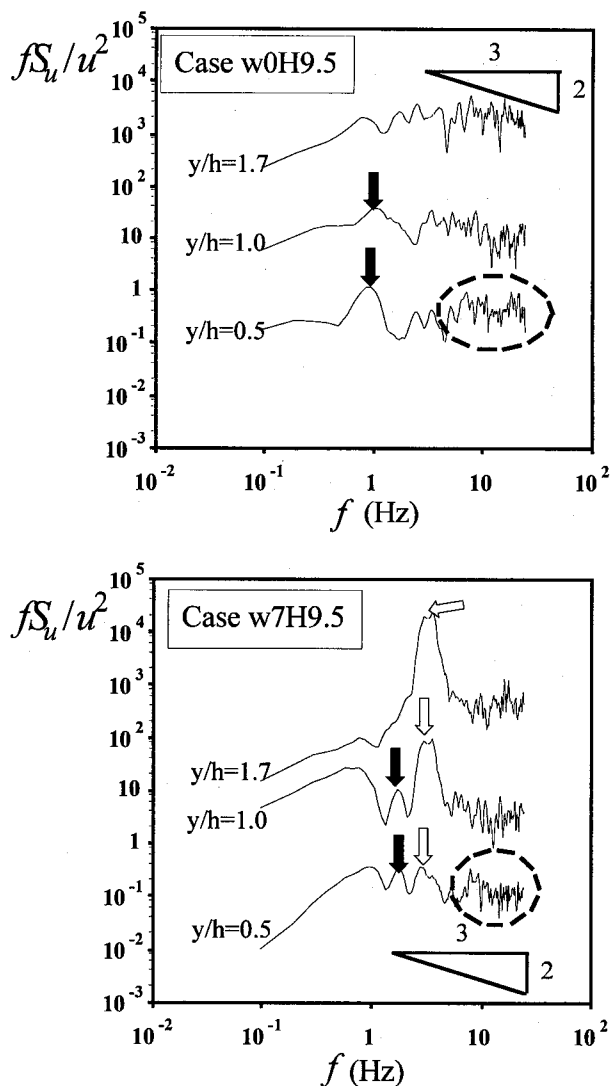


図-10 主流速のパワースペクトルの比較

表される風波固有の卓越周波数 f_p がみられた。これは図-2の水面変動スペクトルの卓越周波数 f_p とほぼ一致することから波動の影響と考えられる。 $y/h = 0.5$ でも f_p が現れていることから植生層内部にまで風波の影響が及んでいることがわかる。また黒矢印で植生流れ特有の組織的変動によるピーク値もみられる。すなわち風波・植生混成場での植生領域では風波成分と植生の組織渦成分による2つの卓越ピーク周波数が観察される。

4. おわりに

本研究は無風植生場と風波発生下の植生場を対象として、全水深を変化させて高速度 PIV 計測を行い、風波をともし植生場の組織乱流構造について考察したものである。ここで得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) 無風植生場と風波・植生の混成場について水面付近の点を基準点とした空間相関解析から、水深が小さい風波をともなう植生場では風波による水面から植生層への強い乱流輸送がみられた。
- 2) 乱れ強度分布と乱れの発生率の比較から風波のある植生場では植生先端付近と風波界面の両方において乱れの生成が大きいことがわかった。
- 3) 瞬間ベクトル分布から水深が小さい風波をともなう植生場では風波による下向きの down burst が発生し、植生層内部にまで入り込む様子が観察された。
- 4) 瞬間渦度分布とベクトル図を併示することで無風植生場では sweep によって渦が植生層内部にまで入り込むことがわかった。また風波のある植生場では風波界面の down burst によって渦が植生層内部に大きく輸送されることがわかった。
- 5) 周波数パワースペクトルからケース w7H9.5 では風波の影響が植生層内部にまで及んでいることがわかった。風波・植生の混成場では風波成分と植生特有の組織渦成分の2つのピーク周波数が観察された。
- 2) Raupach, M. R. and Thom, A.S. : Turbulence in and above Plant Canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.13, pp.97-129, 1981.
- 3) 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.
- 4) 辻本哲郎, 北村忠紀：柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究, 土木学会論文集, No.607/II-45, pp.29-44, 1998.
- 5) Nepf, H. M. and Vivoni, E. R. : Flow Structure in Depth-limited, Vegetated Flow, *J. of Geophysical Res.*, Vol. 105, pp.28547-28557, 2000.
- 6) Poggi, D., Porporato, A. and Ridolfi, L.: The Effect of Vegetation Density on Canopy Sub-layer Turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 111, pp.565-587, 2004.
- 7) Kawai, S. (1982): Structure of air flow separation over wind wave crests, *Boundary Layer Meteorology*, Vol 23, pp. 503-521, 1982
- 8) 加藤始・大島直樹・信岡尚道：画像流速計を用いた吹送流の鉛直分布に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 241-245, 2000
- 9) 竹原幸生・真木正弘・辻本剛三・江藤剛治・高野保英：風波発生時の水面近傍の気流・水流の PTV 同時計測, 海岸工学論文集第46巻, pp.66-70, 2002
- 10) 津守博通・古寺大悟・杉原祐司：風波パラメーターを用いたガス交換係数の実験式, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.86-90, 2002
- 11) 瀬津家久・山上路生・岡本隆明：風波発生下における植生キャノピー開水路流れの乱流構造について, 応用力学論文集 vol.9, pp. 969-976, 2006
- 12) Finnigan, J. J. A.S. : Turbulence in Plant Canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.32, pp.519-571, 2000.

参考文献

- 1) Raupach, M.R., Thom, A.S. and Edwards, L.: A Wind-Tunnel Study of Turbulent Flow close to Regularly Arrayed Rough Surface, *Boundary Layer Meteorology*, Vol.18, pp. 373-393, 1979

(2007年7月12日 受付)