

可撓性を有する沈水性植生層上の組織渦の 三次元構造と穂波の発生

池田駿介¹・金沢稔²・太田賢一³

¹正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 目黒区大岡山2-12-1)
²工修 荏原製作所
³工修 清水建設

実験水路に柔軟な直立性の模擬植生を取り付け、レーザー流速計などを用いて乱れを含む流れの構造の測定を行なった。また、渦の発生周期を調べ、不安定理論によって予測される渦の発生周期との比較を行なった。さらに、PIVによって組織渦の3次元構造について調べた。以上の結果、可撓性を有する沈水性植物の先端部に発生する穂波現象は、流れの持つ不安定性に起因する組織渦が流下しながら植生を变形させることによって生じることが明らかとなった。

Key Words : honami, instability, open-channel flow, organized vortex, Reynolds stress, PIV, Application Visualization System

1. 序論

稲穂などの可撓性を有する植生の上を風が吹くと、植生の組織的な変形によって、植生上端形状が波状となって下流側に伝播して行く穂波現象がよく見られる。このような穂波の発生はInoue¹⁾によって、水田の稲について研究がなされ、植生境界で発生する渦に起因する現象であることが指摘されている。その後、植生境界における運動量や熱、物質(水蒸気、炭酸ガス)の交換能に関する研究が野外測定を中心としてなされ、時間的、場所的に周期的な輸送が発生していることが観測されており(例えば、Gaoら²⁾、村上ら³⁾)、上述の渦の存在を示唆している。

一方、自由表面を有する河川流では、水路底面に生えた沈水性植生上の流れについて研究がなされてきた。初期の、特に外国における研究は植生を伴う流れの流速分布(Raupach & Thom⁴⁾)や流れの抵抗則に関するものであり(例えば、Kouwenら⁵⁾)、流れの詳細な乱流構造などが研究されることはなかった。我国においては、流れの中でたなびいている植生による流速分布の変化や乱れの構造について取り扱った日野・歌原⁶⁾の先駆的研究がある。その後、可撓性の植生を伴う流れ場について室田・福原⁷⁾・⁸⁾によって系統的な研究がなされ、その乱流構造の詳細が明らかとなった。室田・福原の一連

の研究の中で、柔軟な沈水性植生においても大気流れの場合と同じように穂波現象が発生することが示された。

近年、沈水性植生の持つ水質浄化作用などの環境保全機能が注目されるようになり、植生を伴う流れについて数多くの研究がなされるようになりつつある。清水ら⁹⁾は、変形しない直立性植生層上の流れ場の構造について、平均的な乱流構造をk-εモデルを用いて検討し、このような乱流モデルによって平均流速分布やレイノルズ応力分布を比較的良好に表現しうることを報告している。一方、植生層上の大気の乱流構造について、神田ら¹⁰⁾は従来のLESモデルの物理方程式系を拡張して、流れ-植生間の相互作用について数値計算による検討を行っている。その結果、植生境界では大規模渦が発生し、それはローラーとリブで特徴づけられる3次元構造を有していることを指摘している。

このように、我国では植生層上の流れに関する研究が盛んに行なわれている。本研究では、以上の状況をふまえて沈水性植生の穂波現象をその境界に発生する組織渦との関連において調べようとするものである。なお、植生層をともなう流れについては、辻本¹¹⁾による包括的なレビューがあるので参照されたい。

2. 沈水性植生内外の流れの測定

表-1 実験条件の諸元

CASE	Q(1/sec)	H(cm)	S($\times 10^{-3}$)	k(cm)
RUN1	29.8	14.8	4.466	4.0
RUN2	25.2	14.2	3.906	4.2
RUN3	20.4	14.6	2.470	4.5

Qは流量, Hは水深, Sは水面勾配, kは流水時の植生の平均的な高さ

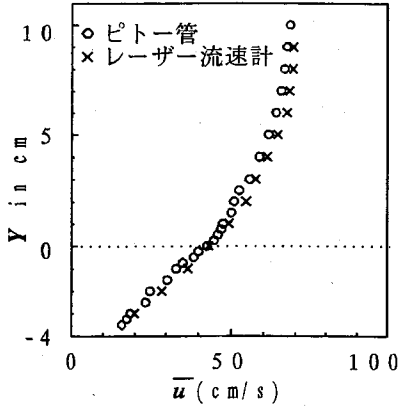


図-1 流下方向流速の分布 (RUN1) Yの原点は植生境界層高さ (点線)

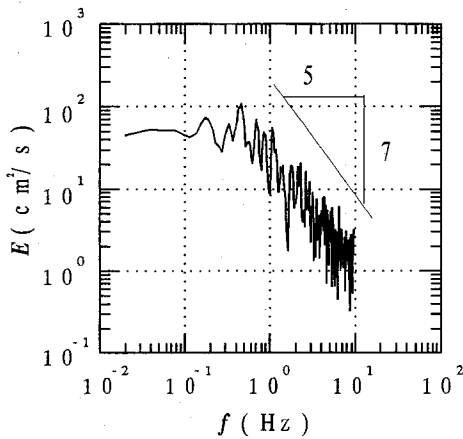


図-2 植生先端における流下方向の流速変動のスペクトル解析の結果 (Run1)

(1) 実験装置及び実験方法

実験は、東京工業大学水工学実験室の長さ15m、幅40cmの循環式可変勾配直線水路を用いて行なわれた。植生模型は1cm角の木製の角柱に5mm間隔で模擬植生を貼り付け、それらを流下方向に7mにわたって水路下流部に設置した。従って、模擬植生の

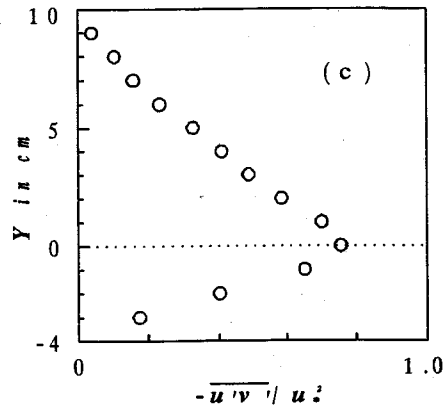
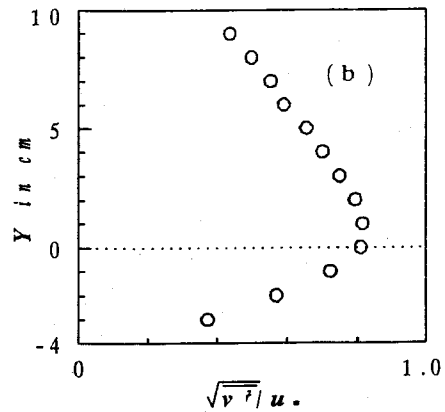
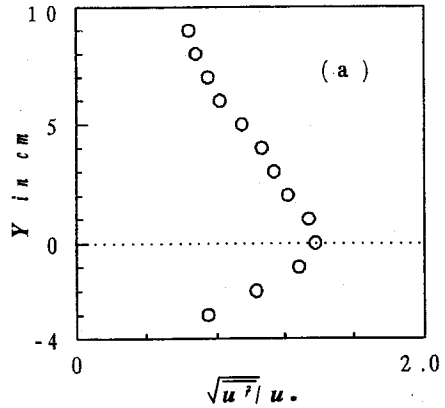


図-3 Run1の乱れの平均諸量の分布(a)流下方向乱れ強度 (b)鉛直方向乱れ強度(c)レイノルズ応力

間隔は流下方向に1cm、横断方向に0.5cmであり、植え付け密度は20,000本/m²である。模擬植生の長さは水中に出ている部分が5cmであり、上端の高さが揃うように貼り付けてある。模擬植生として6.10ナイロンブリッスル (東レ・モノフィラメント社製) を用いた。その物性値は直径0.242mm、曲げ剛

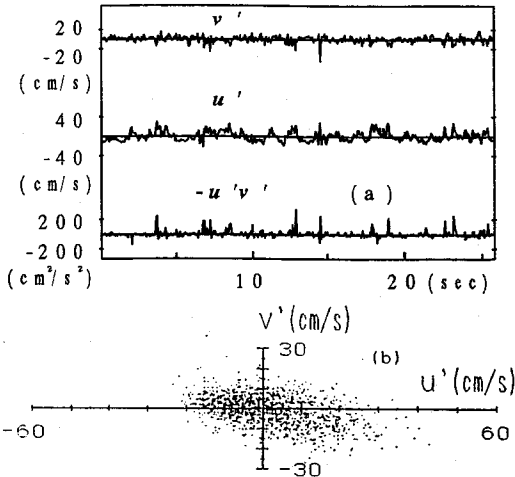


図4 $Y=-2\text{cm}$ (植生境界から下方に2cm) の位置における(a)乱れの生データ(b)4象限分布

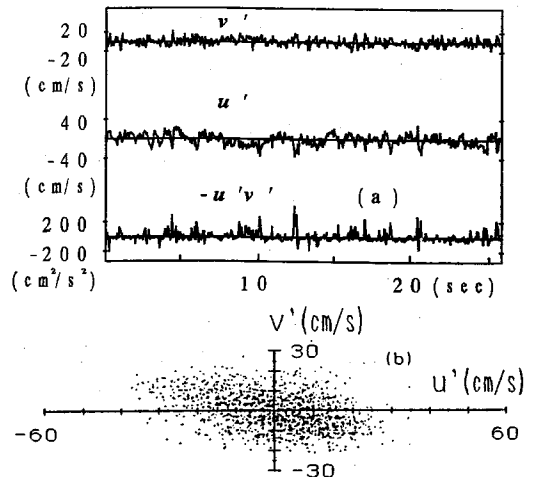


図6 $Y=2\text{cm}$ (植生境界から上方に2cm) の位置における(a)乱れの生データ(b)4象限分布

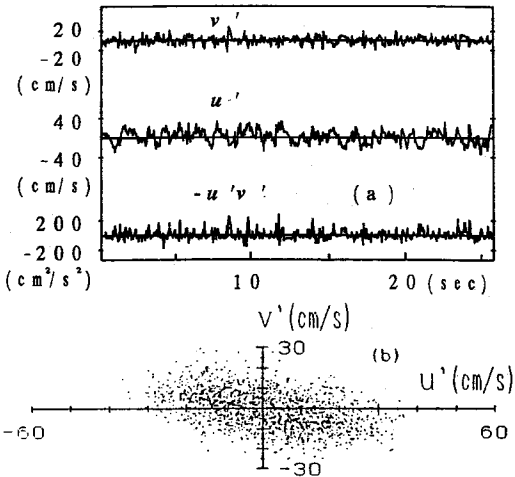


図5 $Y=0\text{cm}$ (植生境界付近) の位置における(a)乱れの生データ(b)4象限分布

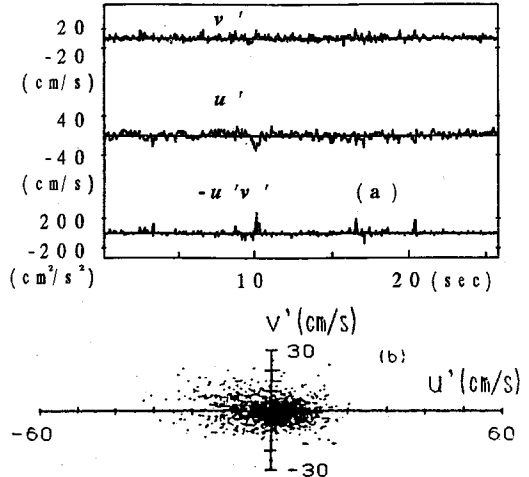


図7 $Y=8\text{cm}$ (水面近く) の位置における(a)乱れの生データ(b)4象限分布

性 $E=1.45 \times 10^4 \text{g/cm}^2$ であり、水流の変化に追従して撓む柔軟性を有している。

流速の測定には、ピトー管及び二成分レーザー流速計 (TSI社製) を用いた。ピトー管を用いた理由は、ピトー管は流速の絶対値を得ることができ、揺動する模擬植生が触れても問題が生じないからである。レーザー流速計の出力は、AD変換器を通して20Hz毎の信号を2048個サンプリングすることを1回として、1測点について5回測定を行った。測定点は、植生上流端から下流に5.5mの地点の水路中央部であり、鉛直方向に13点測定した。実験は、表-1に示されている3ケースについて行った。なお結果は紙面の都合上、Run1について示す。

(2) 実験結果

a) 平均流速分布

ピトー管とレーザー流速計で測定した平均流速 \bar{u} の鉛直分布を図-1に示す。これはレーザー光が模擬植生の中まで入るよう、一部を切り取ったので、その影響を調べるためにピトー管を併用したものであるが、切り取りの影響は見られない。点線は揺動する植生の平均的な高さを示している。流速分布に顕著ではないが変曲点が現れている。また、ここには示していないが、変曲点の発生位置は流速が大きくなる程、下方に移動する傾向が認められた。変形を伴わない模擬植生上の流れについて測定した清水ら^{1,2)}の測定結果では、平均流速分布は奇麗な変曲

点を有しており、しかもそれが発生する位置は、流速の大きさにかわらず、ほぼ植生先端部である。従って、穂波のような植生の揺動によって流体の鉛直方向への運動量交換が促進され、揺動が激しくなる高流速の場合ほど、変曲点が下方へ移動したと考えられる。また、穂波現象を詳しく観察すると、その現象は横断方向に一樣でなく、横断方向に三本程度の縦筋（縦筋間のスケール10cm程度）を有する三次元構造を示していた。

図-2は植生先端付近（ $Y=0\text{cm}$ ）流速変動のスペクトル、 E 、である。ピークは0.5Hz付近にみられる。また、高周波領域では7/5乗程度の勾配を持ち、一般的に言われている5/3乗よりも緩やかな勾配となっており、植生の存在やその揺動によって高周波成分がもつ流れエネルギーが大きくなっていることを示している。

b) 乱れの特性

図-3(a)は、流下方向流速の無次元乱れ成分の強さ u'_{rms}/u_* の分布である。ただし u_* は摩擦速度 $(gHS)^{1/2}$ 、 Y は植生先端高さからの鉛直方向位置である。最大値は、揺動している植生先端部付近において現われ、上方及び下方に向かって減少している。図-3(b)は同様に、鉛直方向流速の無次元化乱れ成分の強さ v'_{rms}/u_* の分布であり、絶対値そのものは u'_{rms}/u_* の場合と比較して小さいものの分布形はよく似ている。図-3(c)は無次元動レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}/u_*^2$ の分布である。植生境界付近で最大値をとり、水面や底面に向かって減少して行く様子は、揺動しない場合の清水ら^{1,2)}の結果と似ているが、清水らの方が植生境界付近での値がより鋭いピークを示している。この原因は、前述したように植生の揺動により、平均流速 \bar{u} の分布が変化したことに対応するものと考えられる。無次元動レイノルズ応力の分布は、 Y が正の部分の分布を底面に向かって外挿すれば1となることから、乱れを正確に測定していることが判断できる。また、動レイノルズ応力は、模擬植生内（ $Y<0$ ）では、底面で0となるよう直線的に減少しており、ここでも模擬植生の切り取りの影響はみられない。

以上のように、室田・福原⁸⁾も指摘しているように植生が揺動している場合においても、乱れは植生境界近傍で主に発生し、それが上方、下方に向かって輸送されているものと考えられる。このような状況を調べるために、乱れ成分について以下に示すような検討を行った。

図-4(a)は、 $Y=-2\text{cm}$ （即ち、植生境界から下方に約2cm）の高さにおける v' 、 u' 及び $-u'v'$ の生出力の一部である。レイノルズ応力が間欠的に現れているが、詳細にみるとレイノルズ応力が現れている位相では、

$u>0$ 、 $v<0$ である場合がほとんどであることがわかる。

図-4(b)は、 u' 及び v' の符号に応じて、4つの象限に分け、前に述べた20Hz毎のデータをプロットしたものである。測定値は、壁乱流でよく見られるように第2象限（ $u<0$ 、 $v>0$ ）と第4象限（ $u>0$ 、 $v<0$ ）に多く分布しているが、やや第4象限の寄与が大きい。図-4(a)で見たレイノルズ応力の発生状況と併せて判断すると、植生内のレイノルズ応力は、植生境界付近の高速流れ（ $u>0$ ）が下向きの乱れ（ $v<0$ ）によって輸送されること、即ちスweep現象によって主に発生していると考えられる。

植生境界付近（ $Y=0\text{cm}$ ）の乱れの様子を示したものが図-5(a)である。この場合には、レイノルズ応力の発生は $u>0$ 、 $v<0$ 及び $u<0$ 、 $v>0$ の両方の場合に生じており、どちらかが卓越しているということはない。 u' 、 v' を第1から第4象限についてプロットした図-5(b)についても同様の傾向がみられ、第2象限と第4象限の寄与はほぼ等しい。

$Y=2\text{cm}$ （即ち、植生境界から上方に約2cm）の状況を図-6に示す。この場合には、図-6(a)に示されているようにレイノルズ応力は、殆んど $u<0$ 、 $v>0$ の場合に生じている。即ち、植生境界付近から間欠的に、低速上昇流（イジェクション運動）が発生し、この流れがレイノルズ応力を発生させていることが知られる。このことは、図-6(b)においても確かめられ、第2象限（ $u<0$ 、 $v>0$ ）の寄与率が大きい。

自由表面近く（ $Y=8\text{cm}$ ）では、流れ方向の乱れ u' はあるものの、大きなレイノルズ応力の出現頻度が減少している（図-7(a)）。図-7(b)の結果も、第2象限の左上に相関を伴う流れが一部現れるものの、大部分の乱れは u 軸近傍に存在しており、 v' との相関を伴わないことを示している。

Maitani & Shaw¹³⁾は実際の樹木層内外の大気流れを超音波風速計を用いて測定し、樹冠付近で発生した乱れは上方に向かってイジェクション運動、植生層内に向かってスweep運動により輸送されることを指摘しており、本研究とほぼ同じ結果が得られている。又、Murotaら¹⁴⁾は沈水性植生について同様な指摘を行っている。

3. 渦の2次元構造及び発生周期

(1) 実験装置及び実験方法

植生境界で発生する渦を可視化し、渦の移動経路を追跡するために流れの中にトレーサーを投入し、植生上端における平均流速で移動するカメラから連続写真撮影を行なった。実験水路、模擬植生の配置は前述の実験と同じである。

表-2 実験条件の諸元

CASE	Q (1/sec)	H (cm)	S ($\times 10^{-3}$)	k (cm)	\bar{u}_B (cm/s)
RUN4	37.5	19.0	4.951	4.2	34.0
RUN5	40.0	16.5	6.412	4.0	50.0
RUN6	24.6	17.1	2.7821	4.2	33.0

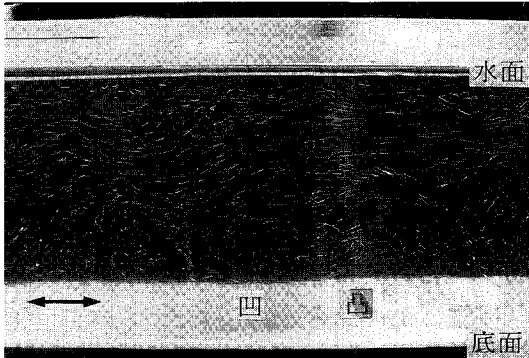


写真-1 渦の可視化写真，写真中央部の植生境界やや上部に前傾した楕円形の渦が存在している（流れは右から左）

カメラの移動は以下の方法によった。水路に沿って全長4.7mのアンクル製の架台を設け，その上に設置されたレールの上にカメラを固定する台車を置き，その台車にワイヤを取り付け，モーター（オリエンタルモーター社製，4RK-25RGN-A）によって牽引した。このモーターは，制御回路を作製することにより，正逆方向，流速条件に合わせた変速，瞬時停止が可能である。撮影は水路側方のガラス面を通して行なうが，水路の一縦断面を取り出して撮影する必要がある。本実験では，スライドプロジェクターを2台水路上方に設置し，撮影側のガラス面から6cmの位置に，区間1mにわたって幅1.3cmのスリット光を照射した。

トレーサーとして，従来の経験から（例えば，文献¹⁵⁾）撮影しやすく，かつ水流への追従性のよい直径0.3~0.5mmの球形ポリスチレン粒子（積水化成社製，比重1.04）を用いた。カメラは35mmの一眼レフカメラを使用し，前述の測定区間1mの間（植生上流端から5m~6mの区間）で5枚の連続写真をとった。撮影条件は露出2.0（Run4,5），1.4（Run6），シャッタースピード1/15秒（Run4,5），1/30秒（Run6），撮影間隔0.23秒（Run4,5），0.14秒（Run6）とした。カメラの移動速度は表-2に示され

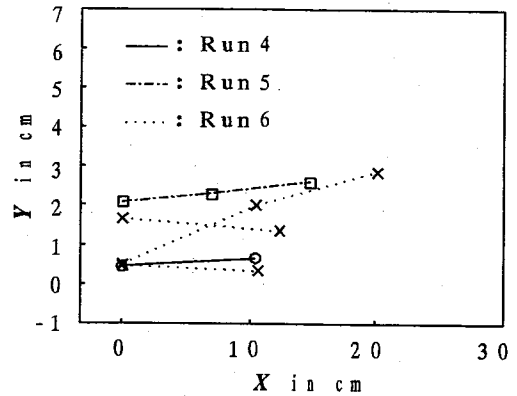


図-8 渦の中心の軌跡（座標Xは流下方向）

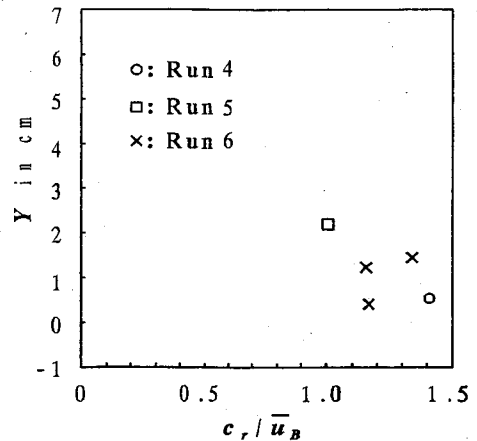


図-9 渦の無次元位相速度 c_r / \bar{u}_B

ている植生境界の平均流速 \bar{u}_B と同じである。又，穂波現象の全体像を把握するために，水路の側方からタイマー付きビデオカメラを用いて撮影し，穂波の周期を調べた。実験は表-2に示す3ケースについて行った。

(2) 実験結果

a) 可視化写真

植生境界の平均流速で移動する座標系から撮影した写真を用いて渦の挙動を調べた。渦の可視化写真の1例（Run4）を写真-1に示すが，写真中央部の植生境界よりやや上部に中心を持つ渦がみられる。数多くの写真にみられた植生近傍に存在する渦の特徴はその形状が楕円形をしており，しかもその長軸が前傾していることである。又，渦の一部は植生層内にも存在していることが写真からわかる。このような渦は，回転方向からその前面で $u > 0$ ， $v < 0$ ，その背面では $u < 0$ ， $v > 0$ となっており，従って常に $-u > v$

表-3 渦発生の理論周期と穂波の実測周期の比較

CASE	方法	周期 (s)
RUN4	実測値 (ビデオ画像)	1.72
	理論値	1.61
RUN5	実測値 (ビデオ画像)	2.08
	理論値	2.03
RUN6	実測値 (ビデオ画像)	1.51
	理論値	1.28

0であるのでレイノルズ応力の発生に大きな寄与をしていることが知られる。

写真からもわかるように、渦の前面部が植生に接している場所では植生境界が凹んでおり、又、上昇流が起こっている渦の背面では植生境界は凸状となっている。即ち、このような渦によって穂波現象が発生していることを示唆している。

スリット光の位置が水路側壁から6cmの位置にあるので、流れは一般に側壁と植生境界双方の影響を受ける領域であるが、渦中心は図-8にも示されているように植生境界から2cm程度上方に存在しているので、主に植生境界の影響を受けて生じている現象であると判断される。

前にも述べたように、スリット光で照射している1mの区間で5枚の写真をとったので、その中には同一の渦が撮影されている場合がある。図-8は、植生境界近くに中心がある渦について、最初に存在が確認された点を原点として、固定座標に直してその軌跡をプロットしたものである。ほぼ水平に移動している渦が多いが、急激な上昇を示している渦も見られる。

このような渦の位相速度 c_p が、植生境界の平均流速 u_m で無次元化され、図-9に示されている。 c_p/u_m の値は、1.0~1.4の間に存在しており、渦の発生域と考えられる植生境界付近の平均流速よりもやや大きいことを示している。側岸部に沿って植生帯を有する開水路流れの植生境界に発生する周期渦に関する線形不安定理論(池田ら¹⁶⁾)によれば、最大発達率を示す渦の位相速度は、やはり植生境界における平均流速よりも大きくなり、その比は植生の密度を表すパラメータの関数となることが示されている。その値は1.0~1.35であり、上記の測定結果とほぼ一致している。しかし、自由水面を有する水平剪

断流場が持つ不安定性により発生する渦は二次元性が強く、その発生周期も安定している¹⁶⁾の)に比べて、本研究で取り扱っているような場で発生する渦は三次元性が強く、かつ流速変動の記録にも見られたように不規則性がやや強い。これらについて以下で検討を行う。

b) 渦及び穂波の発生周期

穂波の発生周期は、時刻が記録されたビデオ画像から読み取った。穂波は下流へ向って伝播して行くことが明確にわかるので、周期の読み取りは比較的簡単である。読み取りは900秒間にわたって行い、これから穂波の平均発生周期を求めた。その結果は、Run4について周期1.72秒であった。しかし、側岸部植生境界に発生する水平周期渦の場合には周期が一定していたのに較べると、穂波の個々の周期には若干ばらつきがみられた。

一方、流速分布に変曲点を有する剪断流れの不安定性を取り扱ったHo & Huerre¹⁷⁾の結果によれば、最大発達率を示す周波数 f は次式で与えられる(著者ら¹⁶⁾も同様な解析を行っているが、理論式中に水平流速分布を定めるための底面摩擦係数 c_f を含んでいるために本条件の場合に直ちに適用できないので、簡便式であるHo & Huerreの式を用いる)。

$$\frac{f\theta}{U} = 0.032 \quad (1)$$

ここに θ は流速分布の持つ運動量厚さ、 U は剪断層上下2境界における流速の平均値である。Run4では $\theta=2.13$ cm、 $U=41.4$ cm/sであるので、 $f=0.62$ Hz(周期1.61秒)となる。この値は、ビデオ画像から読み取った値とほぼ一致している。

以上のような検討の結果を表-3に示す。渦発生の理論値と穂波周期の測定値はよく一致しているが、側岸部植生境界に発生する水平周期渦の場合と同様に(文献16)の図-7参照)、いずれの場合も測定値の方が線形理論から得られる値よりも若干大きい。この原因は、恐らく線形理論では表すことのできない渦の合体に起因しているのではないかと考えられる。又、図-9で見たように渦の位相速度についても、不安定理論による予測と測定結果はほぼ同じ傾向を示している。更に、中立性のポリスチレン粒子を用いた可視化写真を見ても、穂波現象は渦の通過によって発生することが示されている。

従って、植生の穂波現象は、どこかで発生した元の流れの中にある渦が引き起こすというよりは、植生が存在することにより生み出される流速分布に起因して、植生境界で流れが不安定となり、それが組織渦となって、流下しながら植生境界を変形させ、その変形が穂波として伝播するように見えるのであると結論付けられる。即ち、穂波現象は、植生その

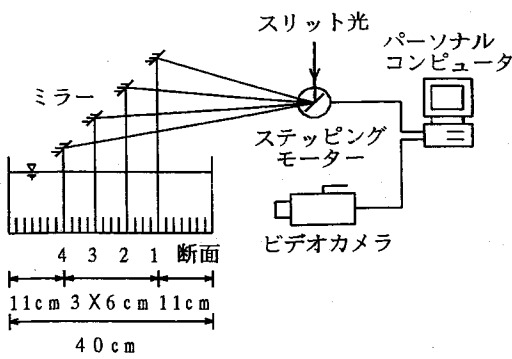


図-10 瞬間像測定装置

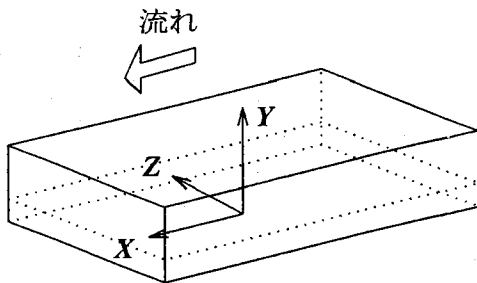


図-11 座標系の定義 Y方向原点高さは植生境界高さ(点線), Z方向原点は水路中心

表-4 P.I.V.を適用した実験の諸元

CASE	Q (l/sec)	H (cm)	S ($\times 10^{-3}$)	k (cm)
RUN7	32.0	18.0	4.21	4.0

ものが流体運動との相互作用により、自ら発生させているということが出来る。

このような現象が植生層内外の運動量、熱、水蒸気その他物質の交換能を増大させていることは既に多くの研究者によって指摘されているところであり、このような研究を更に進めることにより河川の水質浄化機能や、陸地部の植生にあつては水蒸気発散能とそれに伴う気温低下能を最大限に発揮させるような植生密度や植生帯の配置等が明らかにすることが出来るのではないかと考えられる。

4. P.I.V.(Particle Image Velocimetry)を用いた組織渦の3次元構造の推定

(1) 実験装置及び実験方法

前述の実験より、植生境界で発生する渦は3次元構造を有していることがわかった。そこで組織渦の

3次元瞬間像を調べるためにP.I.V.を用いた実験(Run7)を行った。実験水路、模擬植生の配置は前述の実験と同じである。P.I.V.のためのトレーサーは粒径約2mmのポリスチレン粒子(比重1.04)を用い、開水路に投入し循環させた。図-10に示すように、4つの縦断面をステッピングモーター(オリエンタルモーター社製、UMD268A)に取り付けた鏡で切り替えながら、ビデオカメラで連続撮影した。ビデオの撮影とステッピングモーターの回転を同期させるために、ビデオカメラから1/60秒毎に出力されている信号を取り出し、パルス変換器で60Hzのパルスに変換してパーソナルコンピュータに送り、パルスが入力されると同時にステッピングモーターが回転するように制御した。スリット光の厚みはビデオ撮影の光量などを考慮して、約1.5cmとした。

撮影は図-10の右から左に向かって断面-1,2,3,4の順に行い、1断面につき1/30秒間隔で2コマ撮影し、断面-4の撮影が終わると再び断面-1から撮影を繰り返した。撮影区間は、植生の上流端から5.5m付近であり、測定縦断面の横方向間隔は6cm、隣接した断面間の撮影時間間隔は1/15秒である。座標系は図-11に示すように設定する。

横断方向に4つの測定断面で、流れの瞬間像について十分な解像度があるかどうかについては、疎らなデータから仮想加重法を用いて瞬間像を十分推定できるとする孟ら²¹⁾の論文があり、1つの領域で9個のデータから渦構造を推定している。本研究では1つの横断面領域で4(横断方向) \times 17(鉛直方向)のデータがあるので、仮想加重法の適用により解像度は高いと考えられる。

(2) データ解析

a) 平面相関法による速度場の推定

得られた画像データは512 \times 512画素、256階調の分解能を持つ画像処理装置(ケイオー電子工業、IMB-512SL8)によって画面毎にデジタルデータ化した。1画素は約0.75 \times 0.75mmの正方格子となっている。その後、画像のノイズを除去するためにフィルター処理を施した。ここでは加重平均フィルターを適用した。同一断面において連続して撮影された2つの画像から平面相関法を用いて速度場を推定する¹⁸⁾。

平面相関解析の基本的な考え方は、時刻 $t=t_0$ の画像中に検出対象とする部分画像(テンプレート)を設定し、時刻 $t=t_0+\Delta t$ の画像中の各部分画像のうちこれと最も類似度(相関値)の高い位置を検索するというものである。 (x_0, y_0) を中心とするテンプレートの流体は、相関値を最大とするような位置 (x_1, y_1) に

移動したものと推定され、この間の移動速度は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u &= (x_1 - x_0) / \Delta t \\ v &= (y_1 - y_0) / \Delta t \end{aligned} \quad (2)$$

こうして得られた速度は想定した領域のトレーサー群の平均速度であると考えられるので、テンプレートのおきさ n を大きくすると相関解析の信頼度が向上する反面、分解能が低下する。本実験ではテンプレートは 19×19 画素、検索は 21×32 画素の範囲で行った。トレーサーの分布密度が低い等の理由により、相関値の低い領域が生じることがあるが、ここでは 0.6 以上の相関値が得られない場合には欠測扱いとした。こうして求めた流速ベクトルから周囲と著しく異なるものを除去し、欠落しているデータを、既に得られているデータから、距離の逆数の重み付けによって内挿して得た。

b) 仮想荷重法などによる補間

相関解析の結果得られた4断面の流速 (u, v) を、3次元格子点上の値に補間する。4つの測定断面は同時刻のものではないが、断面間の時間差は短いので Taylor の凍結乱流仮説を適用して、断面-2に対して断面-1、断面-3、断面-4を各高さ毎の平均流速 \times 時間差分だけ上、下流にずらした。その際にスプライン補間により格子点上の流速値を得る。次に、横断面内データに次に述べる仮想荷重法¹⁹⁾により 10mm 間隔で補間を行い、3次元格子点上の補間値を得た。

仮想荷重法は、解空間を仮想的ないくつもの荷重の重ね合わせによる弾性平板のたわみと考え、この仮想的な弾性平板に解となるたわみを生じさせるように任意点に配置された仮想荷重 P を求め、それを元に弾性平板上の各点のたわみを推定するものである。本解析の場合には、弾性平板のたわみは各点での流速 u または v に対応している。ある点 Z に単位荷重を作用させたとき、座標 z のたわみをグリーン関数 $G(z, Z)$ とする。 P_i を点 Z_i の仮想荷重と考えると、座標 z_i のたわみ ($=u_i$ または v_i) は各荷重 P_i によるたわみの総和で次式のようになる。

$$U_i = \sum_j G(z_i, z_j) P_j \quad (3)$$

流速ベクトルデータ (u または v) の位置にそれぞれ仮想荷重 P_j があると考え、 P_j の数と式の数が一致して、結局それらの連立一次方程式をガウス・ジョルダン法で解けば P_j が求まる。仮想荷重 P_j が求まれば、式(3)から任意点のたわみ (すなわち u または v) が求まる。

c) MASCONモデルによる三次元流速場の推定

相関解析により直接求められるのは流速の2成分 (u, v) のみであるから、ここではMASCONモデルを

用いて、3次元格子点における (u, v) からスパン方向成分 (w) を推定する²⁰⁾。

MASCONモデルは、Sasaki²¹⁾ によって提案され、Sherman²²⁾ によって3次元流速場の計算に用いられた方法で、連続式を満たすように、付帯条件付変分法によって流れ場を調整する方法である。3次元格子点上で得られた流速補間値を (u_0, v_0, w_0) とすると、連続式を付帯条件として

$\alpha_1^2(u-u_0)^2 + \alpha_2^2(v-v_0)^2 + \alpha_2^2(w-w_0)^2$ を最小とするように u, v, w を決定する。ここで α_1, α_2 は重み係数で、 u_0, v_0 はここでは仮想荷重法で求めた第1次推定値である。本実験では w_0 成分を測定していないので0とする。このことから α_1, α_2 には重みをつけ、 $\alpha_1=3, \alpha_2=1$ とした。Lagrange乗数 λ を導入すれば、問題は次式の汎関数 F の極小値を求めることに帰着する。

$$F = \int_s [\alpha_1^2(u-u_0)^2 + \alpha_2^2(v-v_0)^2 + \alpha_2^2(w-w_0)^2 + \lambda (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z})] ds \quad (4)$$

式(4)から u, v, w は次のように決定される。

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \\ v &= v_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \\ w &= w_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$

これを連続式に代入すると、次式のような λ に関する楕円型偏微分方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2}\right) \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} \\ = -2\alpha_2^2 \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

境界条件は流体の出入りを許す場合、 $\lambda=0$ となり、流体の出入りを許さない場合、 $\partial N / \partial n = 0$ となる。今回の解析では、水面については $\partial N / \partial n = 0$ とし、その他の断面では $\lambda=0$ とした。式(6)をSOR (Successive Over-Relaxation) によって解けば、得られた λ によって式(5)より u, v, w が求まる。

(3) 組織渦の三次元瞬間像

図-12に、渦がとらえられている領域のうちの1断面、 $Z/k=1.50$ (k は植生の平均的な高さ、ここでは 4.0cm) での XY 平面 (縦断面) 内の u, v ベクトル (瞬間流速のベクトル、以下同様) 図を示す。なお、植生層の中はトレーサーが識別できないため、相関解析を行えなかった。従って $Y/k=0$ の平面が植生境界付近となっている。また、流速ベクトルは植生境界の平均流速を差し引いて示している。

図の中心付近 (矢印で示す) に写真-1で見られた

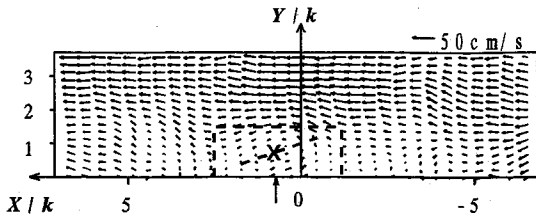


図-12 横断方向 $Z/k=1.50$ における縦断面内の u, v 分布 (点線内が大略の渦の位置, \times 印がその中心)

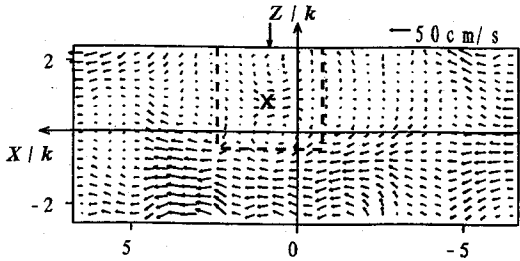


図-13 渦の下面付近の高さ ($Y/k=0.22$) における XZ 平面 (水平面) 内の u, w 分布 (点線内が大略の渦の位置)

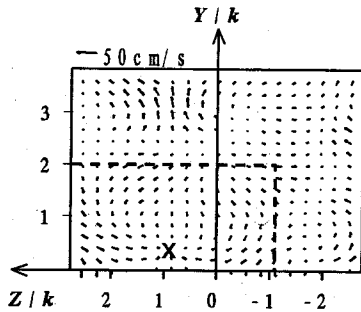


図-14 渦の前端付近 ($X/k=1.32$) における YZ 平面 (横断面) 内の v, w 分布

可視化写真と同様の長軸 (破線で示す) が前傾した楕円形の渦がとらえられている。渦の長軸が下流方向に前傾している事実は、レイノルズ応力の維持に重要な働きをしているとのHo and Huerre¹⁷⁾の指摘を裏付けている。

渦の下面付近の高さ ($Y/k=0.22$) における XZ 平面 (水平面) 内の u, w ベクトル図を図-13に示す。矢印は図-12でみられた楕円渦の中心部に対応している。互いに逆回転している渦対がみられる。

図-14は、図-12で示した渦の前端付近 ($X/k=1.32$) での YZ 平面 (横断面) 内の瞬間流速ベクトル図である。渦の前端付近では下降流が卓越している。これは、乱れの測定の実験でみられたスイ

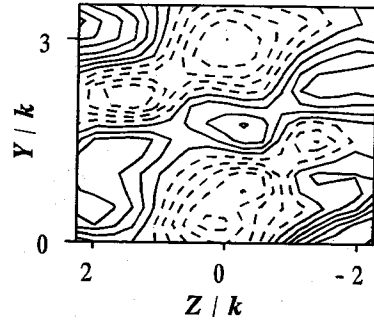


図-15 図-14の位置における X 方向渦度 ω_x の分布, 図の左側に正負の渦度を持つ渦が存在, 実線が正, 破線が負, コンター間隔は $0.5s^{-1}$

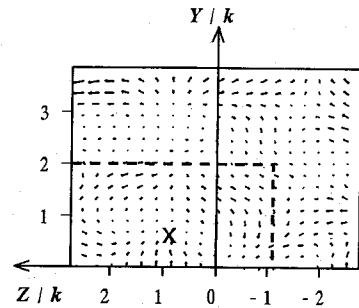


図-16 渦の中心付近 ($X/k=0.88$) における v, w 分布 (点線内が大略の渦の位置)

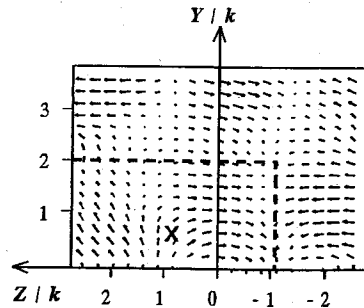


図-17 渦の後端付近 ($X/k=0$) の v, w 分布

ープ現象の現れであり、渦の前面が通過するときに顕著になり、植生がたわむことが予想される。さらに、この位置での横断方向の流れを見てみると、外側から内側へ巻き込むような、収束する流れが発生しているのがわかる。これが、前に述べた穂波の縦筋現象を生み出していると考えられる。同じ YZ 断面 (横断面) における渦度の ω_x 成分 (流下方向成分) のコンター図でみると (図-15), 植生境界上で互いに逆向きの一対の渦対となっている。

一方、図-16に示す渦の中心付近 ($X/k=0.88$) の

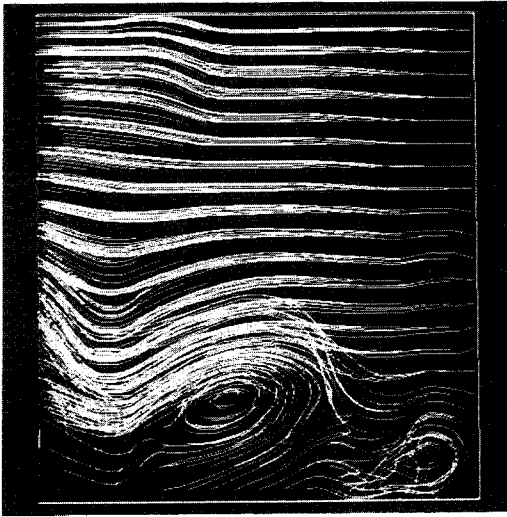


図-18 図-12に対応する流跡線図(流れは右から左),各流線の高さが,図-12の各ベクトルのY方向の高さと一致している。下の境界が植生上端を表している。

断面では上昇流と下降流が生じており,渦の上面では下降流が,また,渦の下面では上昇流が発生している様子がわかる。また,横断方向には,渦の上面では内側から外側に向かう発散する流れが,下面では収束する流れが見える。

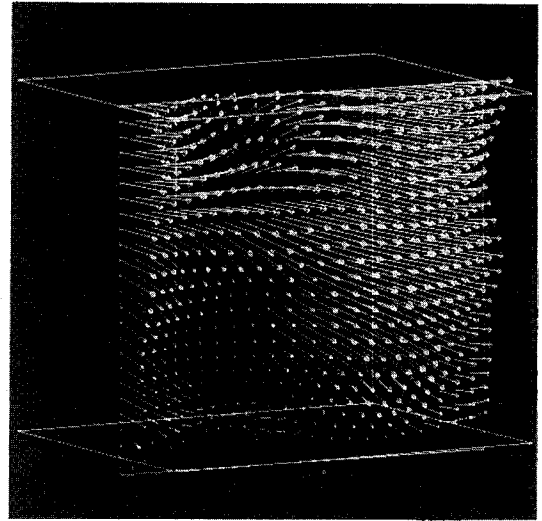
図-17に示されている渦の後端では前端とは逆に上昇流が卓越している。渦の後端が通過することにより,イジェクション現象が顕著に発生し,植生が持ち上がっているものと考えられる。横断方向の流れは,前端とは逆に内側から外側に向かう発散する流れがみられる。

図-18はグラフィックソフトAVS (Application Visualization System) を用いて表した,図-12に対応する流跡線である。底面付近に前傾した楕円形の渦が図-12よりもはっきりと確認できる。

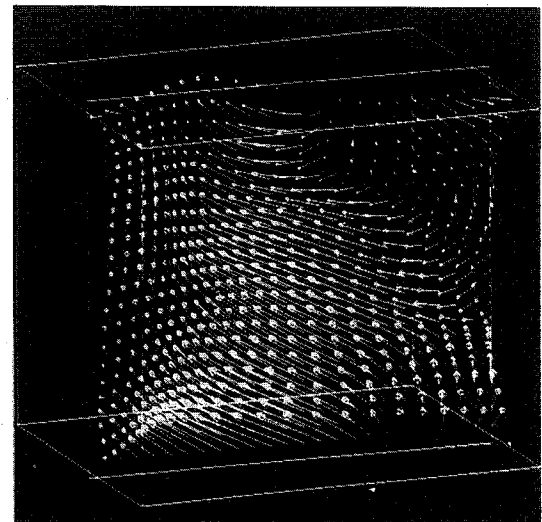
図-19(a), (b)はそれぞれ図-14, 17に対応する横断面内の3次元流速ベクトルをAVSを用いて描いたものである。流れは奥行き方向から手前方向へ向かっている。渦の前端付近を表している図-19(a)の左下方には底面近くで渦に向かって逆向きに流れ込む動きが見られ,渦の後端付近を表している図-19(b)では渦背後の上向き流れがみられる。

5. 結論及び今後の課題

本研究では,柔軟な模擬沈水性植生を配置した水路を用いて,流れに発生する渦及び植生境界面に発生する穂波現象について主に実験的検討を行った。



(a)



(b)

図-19 横断面内u, v, w分布, (a)渦の前端付近 ($X/k=1.32$) (b)渦の後端付近 ($X/k=0.0$),ベクトルの位置は図-14,17に対応している。下端が植生上端である。

以下にその結論を記す。

(1) 植生層境界より極くわずかに上部で流れの乱れ強度,レイノルズ応力は最大となり,ここから上方及び下方に向って,低速上昇流及び高速下降流によって乱れが輸送されている。

(2) 植生層境界面に見られる組織渦は,前傾した楕円形をしていることが特徴であり,渦の前面部の高速下降流により植生層境界が下方に押し付けられ,穂波が発生している。この穂波は渦の流下とともに伝播する。

(3) 不安定理論による擾乱の周波数, 及びビデオ画像から読み取った穂波の周波数がほぼ一致していることから, 植生境界付近で渦度の最大値を持つ剪断流が不安定となり, 個々の渦へ巻き上がることにより渦度を持つ渦へ成長したと判断される。

(4) 上述のように穂波現象と境界面の渦は極めて密接な関係があり, 穂波の発生周期は不安定解析に基づく理論により予測できる。

今後, PIVの測定精度, 特に本研究で開発した三次元の場合の測定精度について検討を行う予定である。

謝辞: 本研究の遂行にあたっては, 河川環境管理財団の河川整備基金助成「河道内植生の水理的特性並びに水質浄化機能に関する研究」及び文部省科学研究費総合研究(A)「河川植生の水理に関する総合的研究」の補助を受けた。又, 実験手法について, 清水義彦氏(群馬大学), 福原輝幸氏(福井大学)に御教示頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Inoue, E.: On the turbulent structure of airflow within crop canopies, *J. Met. Soc. Japan*, Vol.1, pp.317-346, 1963.
- 2) Gao, W., Shaw, R.H. and Pawu, K.T.: Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.47, pp.349-377, 1989.
- 3) 村上智美, 原菌芳信, 川村隆一, 西沢利栄: 気流変化と水稲およびアカマツ群落との相互作用 2. 植物の揺らぎと群落上の乱流輸送特性への影響, 筑波大学水理実験センター報告, 4号, pp.15-29, 1990.
- 4) Raupach, M.R. and Thom, A.S.: Turbulence in and above plant canopies, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.13, pp.97-129, 1981.
- 5) Kouwen, N., Unny, T.E. and Hill, H.M.: Flow retardance in vegetated channels, *J. Irrig. & Drainage Div., ASCE*, Vol.95, IR2, pp.329-342, 1969.

- 6) 日野幹雄, 歌原英明: 水草のある流れの水理学的研究, 土木学会論文報告集, 266号, pp.87-94, 1977.
- 7) 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, 338号, pp.97-103, 1983.
- 8) 室田明, 福原輝幸: 直立性の植物を有する開水路の流れ構造について, 第28回水理講演会論文集, pp.225-231, 1984.
- 9) 清水義彦, 辻本哲郎, 北村忠紀: 植生に覆われた砂床上流れの濃度分布, 土木学会水工学論文集, 35巻, pp.477-482, 1991.
- 10) 日野幹雄, 神田学, 稲垣聡: 植生一大気境界面での運動量輸送に関するLESモデルによる検討, 土木学会水工学論文集, 36巻, pp.689-692, 1992.
- 11) 辻本哲郎: 植生を伴う流れの水理, 土木学会水工学シリーズ91-A-5, 1991.
- 12) 清水義彦, 辻本哲郎, 中川博次, 北村忠紀: 直立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, 438号, pp.31-40, 1991.
- 13) Maitani, T. and Shaw, R.H.: Joint probability analysis of momentum and heat fluxes at a deciduous forest., *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.52, pp.283-300, 1990.
- 14) Murota, A., Fukuhara, T. and Sato, M.: Turbulence structure in vegetated open channel flows, *J. Hydro. and Hydraul. Eng. JSCE*, Vol.2, No.1, pp.47-61, 1984.
- 15) 池田駿介, 木崎茂, 石井修一, 栗林俊一: 波動下の砂漣近傍の流れとエネルギー逸散, 土木学会論文集, 405号, pp.155-164, 1989.
- 16) 池田駿介, 太田賢一, 長谷川洋: 側岸部植生境界の周期渦の発生機構, 土木学会論文集, 443号, pp.47-54, 1992.
- 17) Ho, C.M. and Huerre, P.: Perturbed free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.16, pp.365-424, 1984.
- 18) 西村仁嗣: 海浜変形に関わる碎波現象の実験的研究, 昭和62, 63年度文部省科学研究費補助金(一般研究B)研究報告書, pp.5-7, 1988.
- 19) 日野幹雄, 孟岩, 村山雅昭: 疎らな流速計測データから非定常流れ場全体の瞬間像を推定する試み, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.41, 1989.
- 20) 孟岩, 村山雅昭, 日野幹雄: 3次元組織的乱流構造の瞬間像を推定する試み, 土木学会水工学論文集, 35巻, pp.513-518, 1991.
- 21) Sasaki, Y.: An objective analysis based on the variational method, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.36, pp.77-88, 1958.
- 22) Sherman, C.A.: A mass-consistent model for wind fields over terrain, *J. Appl. Meteor.*, Vol.17, pp.312-319, 1978.

(1994.5.31 受付)

FLOW OVER FLEXIBLE VEGETATION AND 3-D STRUCTURE OF ORGANIZED VORTEX ASSOCIATED WITH HONAMI

Syunsuke IKEDA, Minoru KANAZAWA and Ken-ichi OHTA

Laboratory tests were performed for flow over flexible, artificial vegetations attached to the bottom of an open channel. It is found that the Reynolds stress generated at the boundary of the vegetation is transported upward by ejection and downward by sweep, respectively. The organized vortex generated at the top boundary of the vegetation is closely associated with the transport of the Reynolds stress, and honami(waving of the flexible vegetation) is observed to be produced by the movement of the vortex. The periods of vortex generation predicted by a linear stability analysis agree well with the observed periods of honami generation. The instantaneous three-dimensional profile of the organized vortex was measured by employing PIV method and MASCON model, and it was visualized by using Application Visualization System.