

可撓性を有する沈水性植生内外の流れ及び植生境界で 発生する組織渦の3次元構造について

Flow with vegetation and three dimensional structure of the organized
vortex generated at the boundary of vegetation.

池田駿介* 金沢稔**

By Syunsuke IKEDA and Minoru KANAZAWA

Laboratory tests were performed for flow over flexible, artificial vegetations attached to the bottom of an open channel. It is found that the turbulence generated near the boundary of the vegetation is transported upward by ejection event and downward by sweep, respectively. The organized vortex generated at the boundary of the vegetation is closely associated with the transport of the Reynolds stress. Moreover, instantaneous three-dimensional velocity fields above the vegetation are obtained by using Mass-Consistent model. A close relation between the organized vortex and honami (waving of the flexible vegetation) is observed.

Keywords : vegetation, organized vortex, honami, flow visualization, 3D quasi-instantaneous image, MASCON model

1. はじめに

近年、河川環境の重要性が認識されるようになり、植生が存在するような場の水理学的特性の解明が強く望まれている。草原や水田などの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い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、植生境界に発生する渦によって起こされ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、CO₂）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⁾）、上述の渦の存在を示唆している。また、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。室田・福原^{3), 4)}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観察されることが示された。清水ら⁵⁾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 $k-\epsilon$ 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⁶⁾は従来のLESモデルの物理方程式系を拡張して大気-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、流速分布やレイノルズ応力の分布を予測するとともに、植生境

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

** 学生員 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻

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と指摘している。

このように、わが国では植生層上の流れに関する研究が盛んに行われている。本研究では、模擬植生を使い、穂波現象と同等の現象を発生させ、2成分レーザー流速計による植生層内外の乱れの測定を行い、乱れと植生境界で発生する渦の関係について調べた。さらに複断面可視化実験とMASCONモデルを使って、植生境界で発生する組織渦の3次元構造を推定し、穂波現象との関係について検討をくわえた。

2. 乱れの測定

2-1 実験装置及び実験方法

実験は長さ15m、幅40cmの循環式可変勾配水路を使って行われた。模擬植生は横断方向に0.5cm、流下方向に1cm間隔で、長さ7mにわたって設置した。植生長は5cm、直径は0.242mmであり、6.10ナイロンブリッスル（東レモノフィラメント社製）を用いたが、水流の変化に追従する柔軟性を有している（平均高さで約1cmたわむ）。流速の測定には、ピトー管及び2成分レーザー流速計（TSI製）を用いた。レーザー流速計の出力は、A/D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（約100秒）として1測点につき5回測定を行った。測定点は植生の上流端から5.5m、側壁から20cmの地点であり、底面から水面付近まで1cmおきに鉛直方向に測定した。水理条件は表-1に示す通りである。

2-2 実験結果

ここでは、紙面の都合上、Run1を用いて結果を説明する。ピトー管及び、レーザー流速計で測定した流下方向平均流速 $\bar{u}$ の鉛直分布を図-1に示す。点線は模擬植生の先端部の平均的な高さを示している。これを見ると顕著ではないが、植生境界付近に変曲点が現れている。図-2 (a)はレーザー流速計によって測定された流下方向流速 u の無次元化した乱れ成分の強さ u'_{rms} / u_* の分布である。ただし、 u_* は摩擦速度 $(gHS)^{1/2}$ である。乱れ強度の最大値は揺動している植生先端部付近で現れ、上方及び下方に向かって減少している。図-2 (b)は同様に、鉛直方向流速 v の無次元化した乱れ成分の強さ v'_{rms} / u_* の分布である。最大値となる高さは u'_{rms} / u_* に比べてやや上方に移動しており、値そのものも小さくなっている。図-2 (c)は無次元化した動レイノルズ応力 $-u'v' / u_*^2$ の分布である。植生境界付近で最大となり、水面や底面に向かって減少していく。(a)~(c)いずれも植生境界付近にピークを持っており、植生境界での大きな乱れ、混合の存在を示している。これは揺動を伴わない

表-1 実験条件の諸元

CASE	Q (l/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	4.0
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

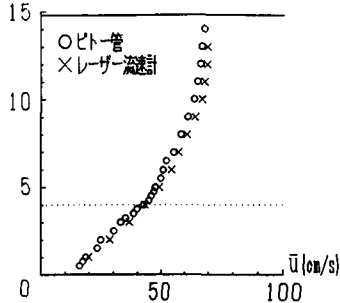


図-1 ピトー管とレーザー流速計で測定した流下方向平均流速 $\bar{u}$

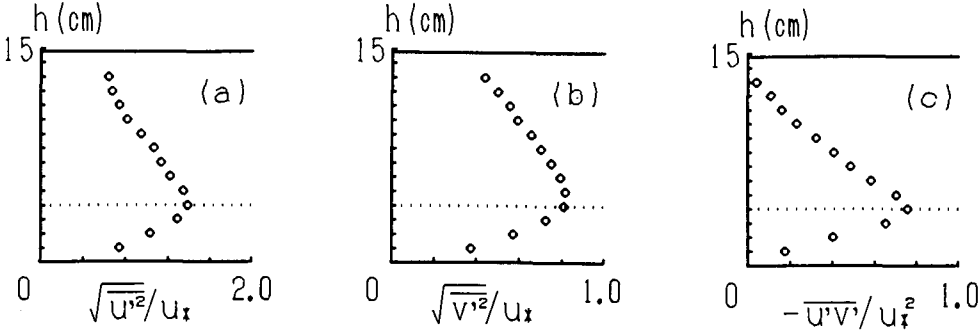


図-2 レーザー流速計による測定結果 (a)流れ方向流速 u の乱れ強度
(b)鉛直方向流速 v の乱れ強度 (c)動レイノルズ応力

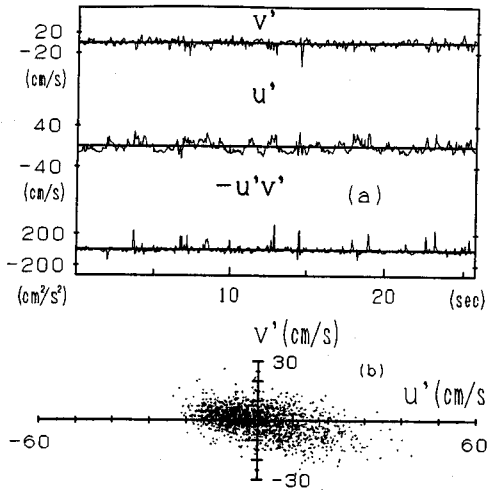


図-3 底面から高さ2cmにおける乱れ成分の
(a)生出力、(b)4象限区分

模擬植生内外の流れについて測定した清水ら⁷⁾の測定結果と一致する。

以上のように、植生が揺動している場合においても、乱れは植生境界付近で発生し、それが上方、下方に向かって輸送されていると考えられる。このような状況をもう少し詳しく調べるために、乱れ成分について以下に示すような検討を行った。

図-3 (a)は、底面から2cm (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、詳しくみるとほとんどの瞬間レイノルズ応力は、 $u' > 0$ 、 $v' < 0$ の位相で現れている。図-3 (b)は u' 、及び v' の符号に応じて、4つの象限に分け、前述した20Hz毎のデータの相関をプロットしたものである。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-3 (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sweep現象と呼ばれる高速流体の下層への入り込みによっておもに発生していると考えられる。このsweep現象は渦の前面が通過するときにかかる下降流の影響と考えられ、よって渦が植生境界付近を多数通過していることが予想される。図-4 (a)は、植生境界付近 ($h=4\text{cm}$) の乱れの様子を示している。レイノルズ応力は、($u' < 0$ 、 $v' > 0$) 及び ($u' > 0$ 、 $v' < 0$) の両方の位相で現れており、どちらかが卓越しているということはない。図-4 (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。図-5 (a)に底面から6cm (即ち、植生境界から上方に約2cm) での u' 、 v' 、 $-u'v'$ の生出力の一部を示す。ここでは、 $u' < 0$ 、 $v' > 0$ の位相でレイノルズ応力が出現する確率が高い。即ち、植生境界付近から間欠的に低速上昇流 (ejection) が発生し、この流れによって大きなレイノルズ応力が輸

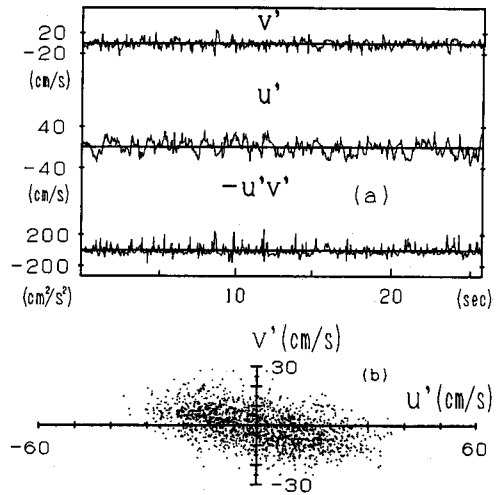


図-4 底面から高さ4cmにおける乱れ成分の
(a)生出力、(b)4象限区分

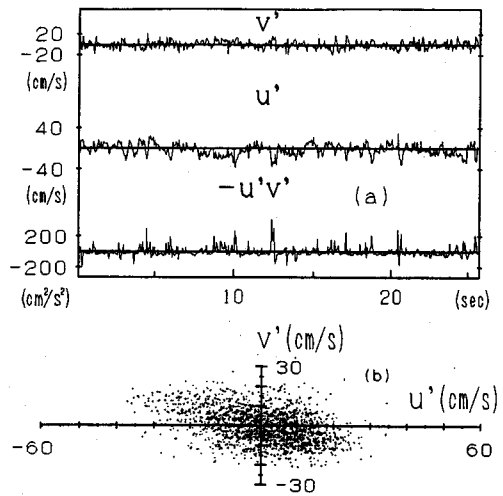


図-5 底面から高さ6cmにおける乱れ成分の
(a)生出力、(b)4象限区分

送されていることがわかる。このことは、図-5 (b)によっても確かめられ、第2象限 ($u' < 0, v' > 0$) の寄与率が大きい。

Maitani&Shaw⁸⁾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ejection現象、植生層内に向かってsweep現象により輸送されることを指摘しており、本研究とはほぼ同じ結果が得られている。

3. 組織渦の3次元構造

3-1 可視化実験装置及び実験方法

実験は、長さ15m、幅40cmの循環式可変勾配水路を用いて行われた。模擬植生の配置は2-1と同じである。可視化実験のためのトレーサは粒径約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-6に示すように、4つの縦断面をステップングモーター(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。撮影区間は、植生の上流端から5.5m付近である。ビデオの撮影とステップングモーターの回転を同期させるためにパーソナルコンピュータで制御した。ステップングモーターの単位ステップ角度は 0.9° である。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。撮影は図の右から左に向かって(断面-1, 2, 3, 4)行い、1断面につき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。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-7に示すように設定する。水理条件は流量 $32(1/s)$ 、水面勾配 4.21×10^{-3} 、水深Hは18.0cmである。植生の平均的な高さkは約4.0cmである。

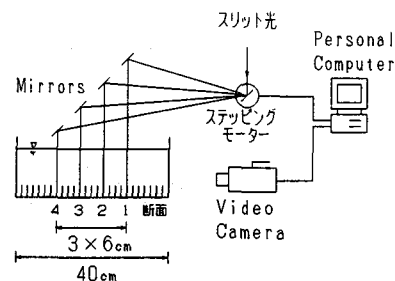


図-6 可視化実験装置

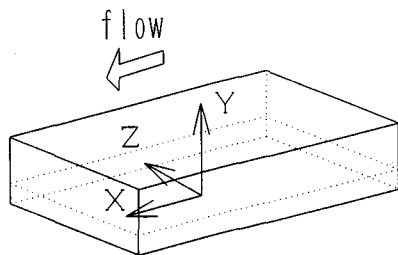


図-7 座標系

3-2 データ処理

得られた画像データは 512×512 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-512 SL8)によって画面毎にデジタルデータ化した。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により速度場を推定する。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 $t=t_1$ 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。こうして得られた速度は想定した領域のトレーサ群の平均速度であると考えられるので、テンプレートの大きさ 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する。

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を各水平断面の平均流速 $\times$ 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、横断面内データに仮想荷重法⁹⁾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る。

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モデルを使って、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。MASCONモデルは、mass consistentな場を表わすモデルという意味であり、連続式を満たすように、付帯条件付変分法によって w 成分を含めて流れ場を調整する方法である。なお、MASCONモデルについての詳細は文献10)を参照されたい。

3-3 実験結果

図-8 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 4.0 cm) での XY 平面内の速度変動 u , v ベクトル図を示す。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いる。この図を見てわかるように、図の中心付近 (矢印で示す) に楕円形の渦がとらえられている。しかも楕円形の長軸 (破線で示す) が前傾している。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欠かせないことである (円形の渦構造ではレイノルズ応力は生成されず、傾きが逆だとレイノルズ応力は負になる)。

図-9 (a), (b), (c) はそれぞれ、図-8 で示した渦 (図-9 では $Z/k > 0.75$ の領域に存在している) の前面、中心、後面の位置 ($X/k=1.32$, $X/k=0.88$, $X/k=0$) での横断面内 (YZ 平面) の速度変動 v , w ベクトル図である。渦の前面(a)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

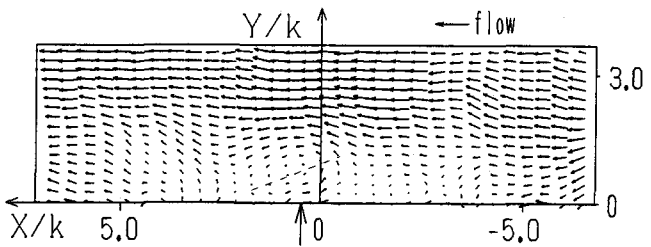


図-8 XY 断面内の速度変動 u , v のベクトル図 ($Z/k=1.50$)

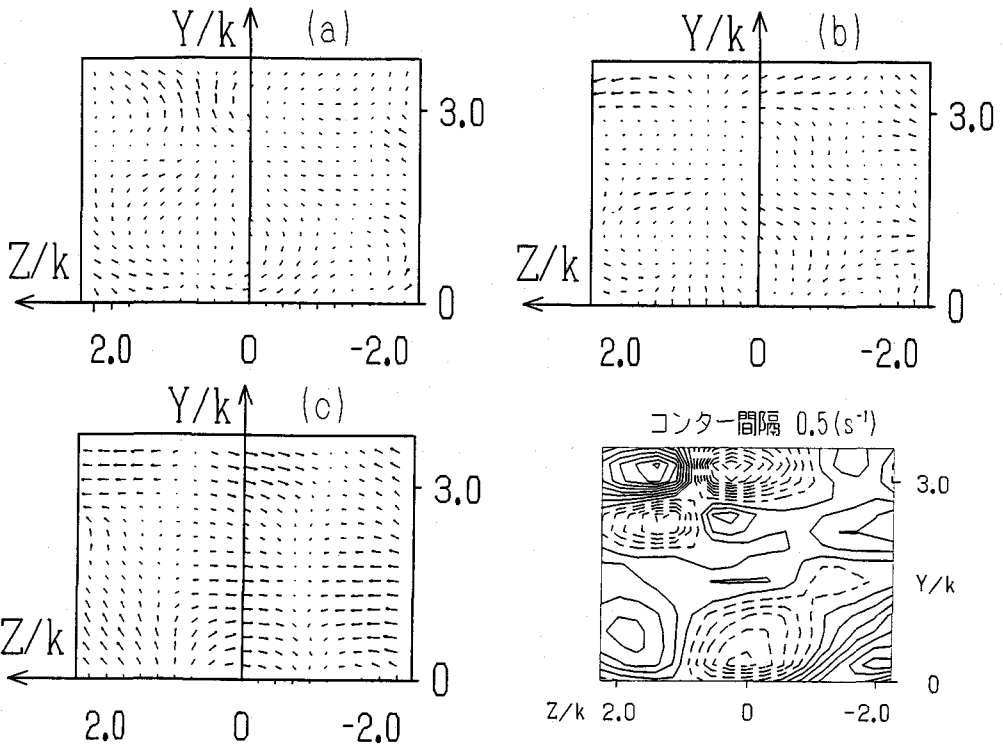


図-9 YZ 断面内の速度変動 v , w のベクトル図
(a) $X/k=1.32$ (b) $X/k=0.88$ (c) $X/k=0$

図-10 YZ 断面内の渦度ベクトル ω_z の
コンター図 ($X/k=1.32$)

sweep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、実際、ビデオ画像でみると渦の前面で植生がたわんでいるのが確認できる。さらに、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。同じYZ断面における渦度の ω_x 成分（流下方向）の

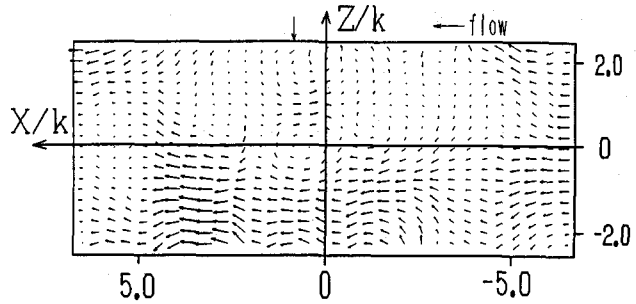


図-1 1 XZ断面内の速度変動 u 、 w のベクトル図($Y/k=0.22$)

センター図でみると(図-10)、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、渦の中心付近の断面(b)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。渦の後面(c)では(a)とは逆に上昇流が卓越している。渦の後面が通過することにより、ejection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、(a)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。最後にXZ平面内の速度変動 u 、 v ベクトル図を図-11に示す。矢印は図-8でみられた楕円渦の中心部に対応している。図-11は渦の下面付近の断面($Y/k=0.22$)であるが、互いに逆回転している渦対がみられる。

4. おわりに

レーザー流速計による測定により、植生境界付近で流れの乱れ強度、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かって、低速上昇流(ejection)及び高速下降流(sweep)によって乱れが輸送されていることがわかった。また、複断面可視化実験と、MASCONモデルにより、組織渦の3次元構造をとらえることができた。植生境界で発生する渦は、前傾した楕円形をしていて、渦の前面で下降流が、渦の後面で上昇流が生じており、渦の通過により穂波現象が発生している。また、横断方向にきった断面でみると互いに逆回転の渦対が存在している。

謝辞

本研究は文部省科学研究費総合A(代表:池田駿介, 04302043)の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Inoue, E. : On the turbulent structure of air-flow within crop canopies, J. of Meteorol. Soc. Japan, 41, pp. 317-326, 1964.
- 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) 室田明・福原輝幸:水生植物を有する開水路流れの水理学的研究、土木学会論文集、266号、pp. 87-94、1977.
- 4) 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.
- 5) 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、p. 477-482、1991.
- 6) 神田学・稲垣聡・日野幹雄:植生一大気境界面における大規模渦構造と運動量交換に関するLESモデルによる検討、土木学会論文集、461号、pp. 39-48、1993.
- 7) 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、438号、pp. 31-40、1991.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.