

機関番号：14301  
 研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20360218  
 研究課題名（和文）風波界面・植生キャノピー混成流における組織乱流構造と物質輸送機構の  
 解明  
 研究課題名（英文）Coherent structure and the associated mass transfer in wind-driven  
 water-waves over canopy vegetation  
 研究代表者  
 禰津 家久（NEZU Iehisa）  
 京都大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：30109029

研究成果の概要（和文）：本研究は、地球温暖化現象の素過程を解明するために、水・空気界面での組織乱流構造とそれに伴う物質輸送機構を解明し、さらに河床に植生を有する開水路乱流の組織構造と物質輸送の関係を PIV などの画像解析と LIF の濃度同時計測で解明した。風波界面開水路には、ラングミュア循環流が発生し、流れが 3 次元になることをステレオ PIV を用いて解明し、また、①平均流成分、②波動成分、③乱れ成分間のエネルギー輸送を考察した。

研究成果の概要（英文）：The present study is to reveal the coherent structure and the associated mass transfer in wind-driven water-waves/free-surface flows over canopy vegetation by using a combination of PIV, PTV and LIF simultaneous measurements. A large-scale secondary current, i.e., Langmuir circulation, is generated in wind-induced free-surface flows and contributes largely to mass transfer in 3D fashion. Furthermore, the present study revealed the interaction between the coherent vortex and the vegetation motion, which is called the *Monami* phenomenon, and also examined the mass transfer by using simultaneous measurements of velocity and dye concentration.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2010 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	11,400,000	3,420,000	14,820,000

研究分野：水理水工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：開水路乱流、風波界面現象、植生キャノピー流れ、組織乱流構造、PIV 計測、ラングミュア循環流、藻波現象、レーザー流速計

## 1. 研究開始当初の背景

21 世紀は環境問題が最重要課題であり、その中でも地球温暖化問題を解決するには大気中の炭酸ガス含有量の削減が世界的に急務であり、水層と空気層の異層界面における炭酸ガス交換や物質輸送特性を解明することが不可欠である。特に、組織乱流構造が物質輸送に及ぼす効果を解明したい。

## 2. 研究の目的

本研究は、(1) 風波界面乱流と、(2) 植生キャノピー流れを取り上げ、その組織乱流構造と物質輸送現象をレーザー流速計や PIV を用いて実験的に解明する。また、開水路植生キャノピー床上の風波界面現象という複雑乱流の解明にも研究の先鞭をつけたい。

### 3. 研究の方法

#### (1) 風波界面における組織乱流構造の研究

本研究ではPIVによって風波を伴う閉鎖性水域の乱流計測を行い、①平均流成分、②波動成分と③乱れ成分間のエネルギー輸送および乱れ生成特性を考察した。Wavelet手法を用いて、3重分解を行い、①から③の相互作用を検討した。また波のクレストおよびトラフにおける乱流構造の違いに注目し、位相解析を行った。

一方で、海洋や湖沼水面における物質拡散は水域環境工学における重要な研究課題であり、実験的な解明が求められている。そこでPIVの時間空間の流速分布から求めたマーカー粒子の挙動を計算し、風波水面下における溶存物質の移流拡散特性を定量評価した。

#### (2) 風波乱流の3次元構造に関する研究

風波が発生する水層の流れには、ラングミュア循環流と呼ばれる大規模な縦渦構造が存在することが知られている。風下方向に軸を持つ2次流構造である。ラングミュア循環流によって下降流が現れる領域の水面ゾーンでは収束流(convergence zone)が発生し、風(wind)によって海藻などが列(row)を形成することからwindrowと呼ばれている。また上昇流が現れる領域の底面側ではconvergence zoneが発生し、河床材料やプランクトン等が集積・再浮上する。このようにラングミュア循環流は表層の混合を促進し、下層からは赤潮の原因となる栄養塩等を巻き上げるなど沈降物質の再浮上に影響を与えており、3次元的な物質輸送の解明が不可欠である。

そこで本研究では従来の鉛直断面PIVや水平面PIV計測に加えて水中カメラによる横断面PIV計測法を開発し、風波を伴う閉鎖性水域の3次元乱流構造を解明することに着手した。横断面PIVではラングミュア循環流の時間平均構造や位相平均構造の特性を解明した。また、水平面PIVと染料濃度実験の結果では、ストリーク構造と収束流などの特性を明らかにした。鉛直面PIVのデータから、①平均流成分、②波動成分、③乱れ成分間のエネルギー輸送および乱れ生成特性を考察できた。さらに、研究最終年度には、ステレオPIV法を開発して、ラングミュア循環流の3次元構造を直接計測することに成功した。

#### (3) 植生キャノピー組織乱流の研究

実河川の植生の多くは柔軟性を有しているため、流れ場が複雑となり未解明点が数多く存在する。本研究では、柔軟植生の組織的な揺動すなわち「藻波現象」と大規模渦構造の関係を解明することを第一の研究目標に

した。断面平均流速、植生長さなど水理条件を系統的に変化させて水路実験を行い、藻波現象の発生条件について検討した。限界摩擦速度を定義することで、藻波現象を判別することができることを示した。また従来の植生研究ではPIV画像計測やレーザー流速計(LDA)また超音波流速計(ADV)による流速計測のみを行っているのが大半であるが、柔軟植生流れでは植生が変形し流れ場に大きな影響を与えるため、流速計測に加えて植生の揺動状態を把握することが重要である。そこで本研究では、柔軟植生の先端に蛍光粒子を付着させてレーザーライトシートを照射することで、粒子をPTV追跡し植生先端位置を計測することに成功した。さらに、PTVとPIV法と同時併用することで、新たに柔軟植生の揺動と瞬間流速を同時計測する手法を開発し、この分野の研究に先鞭をつけた。

#### (4) 植生開水路乱流の物質輸送メカニズム

植生流れでは植生先端部で大規模渦が発生・発達し物質輸送メカニズムは大きく変化すると考えられるが実験的に検討した例が少なく、十分な知見が得られていない。そこで本研究では底面に植生帯を有する開水路流れにおいて染料実験を導入し、レーザー蛍光誘起法(LIF)によってスカラー量の乱流拡散現象を計測した。LIF用のカメラにはシャープカットフィルターを装着し、染料(ローダミンB)による誘起光のみを撮影できるように設定した。さらに本研究では、高速度カメラ2台を用いてLIFとPIV法を併用することで、瞬間濃度分布と流速ベクトルを同時計測した。この手法によってスカラーフラックスを直接計算して比較検討することが可能となった。本研究で得られた解析データから、植生密度と物質輸送効率の関係を解明した。

### 4. 研究成果

#### (1) 風波界面における組織乱流構造とエネルギー輸送に関する成果

波と乱れの分離には様々な方法があるが、wavelet変換による多重解像度解析はスペクトル解析と異なり、時間情報を保持したまま測定データを周波数帯ごとに分離できる特徴をもち工学・理学の様々な分野に応用されている。またLFTは波・乱れ相関がゼロの仮定、SFMは波動せん断応力がゼロの仮定をそれぞれ用いることに対し、waveletではこれらの仮定も評価できる利点がある。そこで本研究では離散wavelet解析を適用した。

離散wavelet解析はその特性上、計測サンプリング周波数の1/2, 1/4, 1/8, 1/16・・・倍の周波数によって周波数帯に分ける。本実

験ではサンプル周波数は 50Hz なので、25～50Hz, 12.5～25Hz, 6.25Hz～12.5Hz, 3.125～6.25Hz・・・の周波数帯に分離することになる。瞬間流速  $\tilde{u}$  は次のように時間平均成分  $U$ 、波動成分  $u_w$  および波動を除く乱れ成分  $u_t$  に 3 重分解できると仮定する。波動成分は  $f_p$  を含むように 1.56～3.12Hz の周波数帯を抽出した。

$$\tilde{u} = U + u_w + u_t \quad (u = u_w + u_t) \quad (1)$$

このとき、レイノルズ応力  $-\overline{uv}$  は次のように分解される。

$$-\overline{uv} = -\overline{u_w v_w} - \overline{u_t v_t} - \overline{u_w v_t} - \overline{u_t v_w} \quad (2)$$

したがって、平均流エネルギー  $U_i^2/2 (i=1,2,3)$  の輸送方程式における主要なエネルギー損失  $E = \overline{uv} \partial U / \partial y$  は式(3)のように分解される。 $G = -E > 0$  が乱れ生成項となる。

$$E = (\overline{u_w v_w} + \overline{u_t v_t} + \overline{u_w v_t} + \overline{u_t v_w}) \times \partial U / \partial y \quad (3)$$

この中の 1 項目の符号を反転した  $-\overline{u_w v_w} \partial U / \partial y$  は波動エネルギー  $u_w^2/2 (i=1,2,3)$  の輸送方程式の生成項となる。同様に 2 項目の符号を反転した  $-\overline{u_t v_t} \partial U / \partial y$  は乱れエネルギー  $u_t^2/2 (i=1,2,3)$  の輸送方程式の生成項となる。したがってこれらの正負を調べれば、平均流⇄波、平均流⇄乱れのエネルギー輸送の方向がわかる。

図-1 は、2次元重力波のケースにおける無次元レイノルズ応力  $-\overline{uv}/U_*^2$ 、式(3)中の波動成分による応力  $-\overline{u_w v_w}/U_*^2$ 、バックグラウンドの乱れによる応力  $-\overline{u_t v_t}/U_*^2$ 、および乱れと波の相関項  $(-\overline{u_w v_t} - \overline{u_t v_w})/U_*^2$  の分布を示したものである。界面近傍では  $\partial U / \partial y > 0$  であることを考慮すると、 $-\overline{u_w v_w} < 0$  は波動場から平均流にエネルギーが供給されることがわかる。一方で  $-\overline{u_t v_t} > 0$  なので平均流から乱れへエネルギーが供給される。すなわち波動場から平均流を媒介して乱れへエネルギーが輸送され、乱れが発生することを意味している。相互作用項は乱れ成分の応力と同様に界面付近で正值をとるが、波動応力に比べるとエネルギー輸送への寄与は小さい。成分間のエネルギーの輸送には、相互作用よりもむしろ波動応力の存在が重要であると考えられる。表-1 に以上の特性を整理した。さらに、位相平均構造も解明している。これらの詳細な成果は、Environmental Hydraulics (環境水理学) の論文集に掲載され、高い評価が得られている。

表-1 位相とエネルギー輸送方向の関係

位相	エネルギー輸送の方向
トラフ時	平均流⇄波動, 平均流⇄乱れ
増水時	波動⇄平均流, 乱れ⇄平均流
クレスト時	平均流⇄波動, 乱れ⇄平均流
減水時	波動⇄平均流, 平均流⇄乱れ

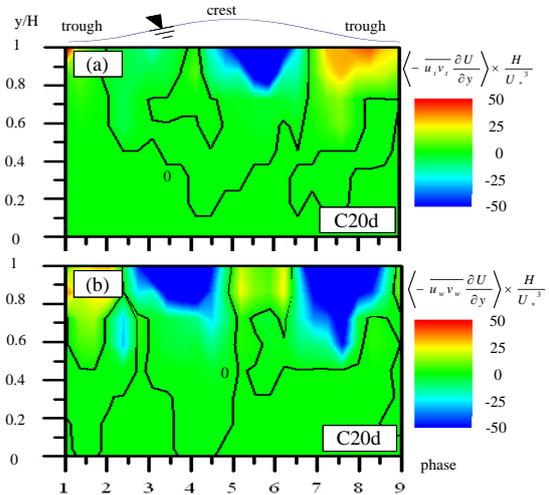


図-1 生成項の位相変化 (a) 乱れ成分 (b) 波動成分

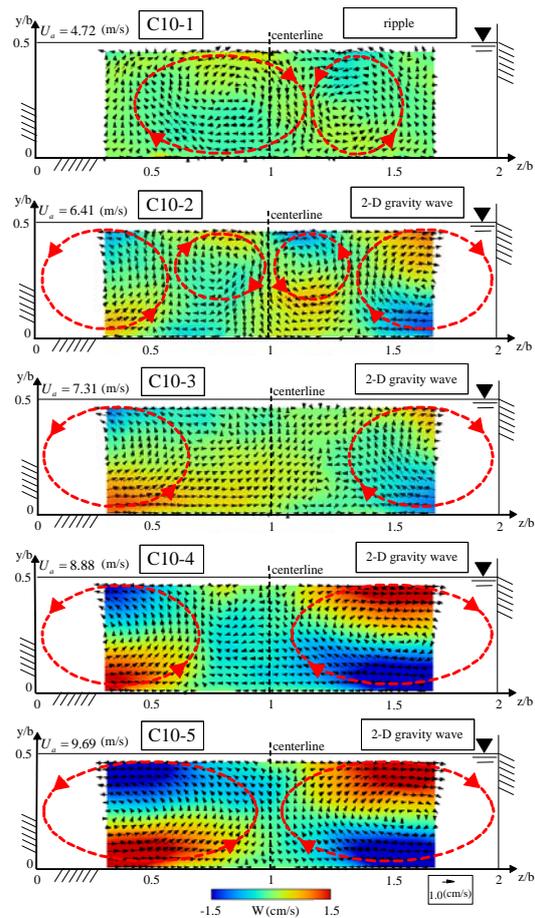


図-2 ラングミュアセルの横断面構造

## (2) 風波乱流の3次元構造に関する成果

図-2 にアスペクト比  $B/H=4$  における時間平均流速ベクトル( $V, W$ )と横断流速成分  $W$  のコンターを示す。風速  $U_a$  を変化させてこの影響を比較した。横軸は側壁を 0 として横断方向に  $b$  で無次元化し、縦軸は底面を 0 として鉛直方向に  $b$  で無次元化した。ここで、 $b=B/2$  は水路半幅であり、点線は水路中央(以下、センターライン、 $z/b=1$ )を示す。風は紙面の奥から手前に向かって吹いている。図中の流速ベクトルからラングミュア・セル(以下、LC)が確認でき、ベクトル分布から目視にて判読した流向を赤矢印で示した。なお、側壁近傍で PIV データが欠落するのは、本領域では水路の構造フレームによって LLS が遮光されるからである。ripple 波の C10-1 でセンターライン近傍で循環渦構造がみられるものの左右対称ではなく不安定である。したがってこれらが通常の LC と断定することはできない。また重力波で風速が小さい C10-2 では 4 つの LC が確認できる。風速が増加するとセンターライン近傍に存在する渦対は消滅し、LC の数は 2 つとなる。また興味深いことに風速の増加とともに C10-2 において外側に位置した LC の大きさが横断方向に広がるとともに横断流の流速ベクトルの大きさも増加する傾向がみられる。このように風速、波高とアスペクト比によってラングミュア循環流の生成特性が異なることがわかった。これらの成果は、土木学会論文集や Environmental Fluid Mechanics などのジャーナルに出版され、高い評価が得られている。

## (3) 柔軟植生の揺動と流速変動の相関構造に関する成果

本研究では流速と植生変位を同時計測したので、植生の揺動と組織乱流の相互関係について考察することが可能であり、本研究の特色の 1 つになっている。図-3 に植生先端位置の瞬間流速と柔軟植生変位の時系列データを示す。植生 1 は計測画像の上流側の植生で、植生 2, 3, 4 は植生 1 より下流側の植生である。植生間距離  $L_v$  は一定で  $L_v=3.2\text{cm}$  である。高速流の発生時( $u > 0$ )には植生がたわみ( $\Delta h_{d1} < 0$ )、低速流体の通過時( $u < 0$ )には植生が起き上がっている( $\Delta h_{d1} > 0$ )のがみられる。このことから植生先端変位  $\Delta h_d(t)$  と瞬間流速  $u(t)$  には負の相関があることがわかる。

また下流側の植生( $i=2, 3, 4$ )の揺動の時系列から流下方向距離の近い植生の揺動どうしの位相はほぼ一致しており、植生は組織的に揺動している。植生間の距離が流下方向に離れると位相はずれていくが、植生変位のピークが流下方向に伝わっているのがわかる。

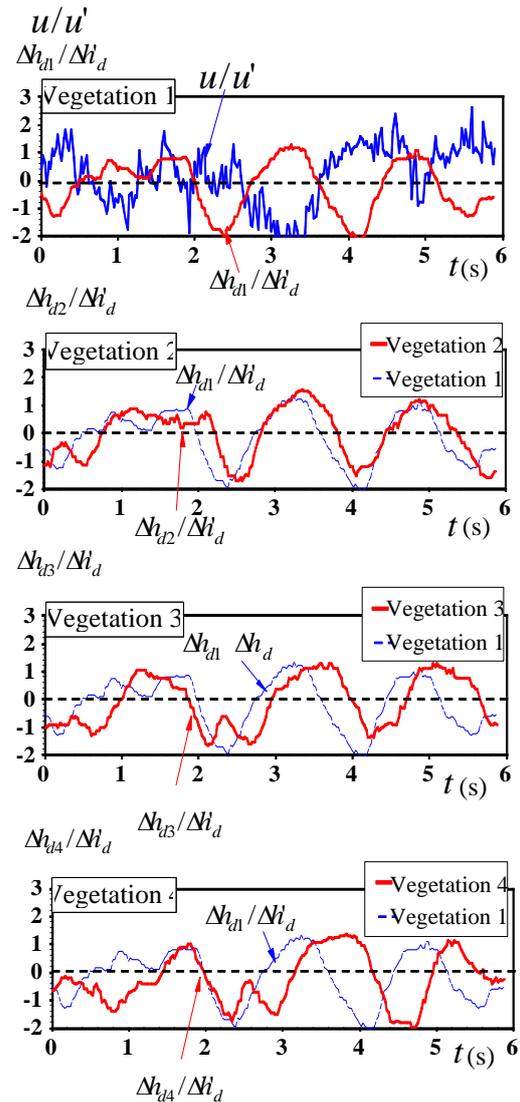


図-3 流速と柔軟植生変位の時系列

図-3 の結果から Sweep( $u > 0$ )や Ejection( $u < 0$ )のような組織乱流構造が移流されることで植生の組織的揺動である藻波(Monami)現象が発生することがわかった。これらの詳細な研究成果は、権威のある国際ジャーナル Journal of Hydraulic Research に 2009 年に出版し、高い評価が得られている。

## (4) 植生の揺動状態の判定に関する成果

柔軟植生は水理条件によって揺動状態が変化することが知られている。本研究では限界摩擦速度  $U_{*c}$  を植生変位から定義することで植生の揺動状態を定量的に評価し、区分することを試みた。すなわち、摩擦速度  $U_*$  がこの  $U_{*c}$  を超えたケースでは植生が倒伏状態(Prone)になるとした。また個別にたわむ状態(Swaying)と組織的に揺動する状態(Monami)を目視とスペクトル解析によって判定し、判

定基準値を  $U_m/U_{*c}=0.7$  とすればよいことがわかった。図-4は、摩擦速度と断面平均流速の関係を示す。各植生モデルの限界摩擦速度  $U_{*c}$  の値を別枠に示している。限界摩擦速度  $U_{*c}$  は植生長さ  $h$  が長くなると小さくなる傾向が得られ、注目される。これは植生が長くなると植生が大きく折れ曲がり、*Monami* や *Prone* 状態になりやすいためである。

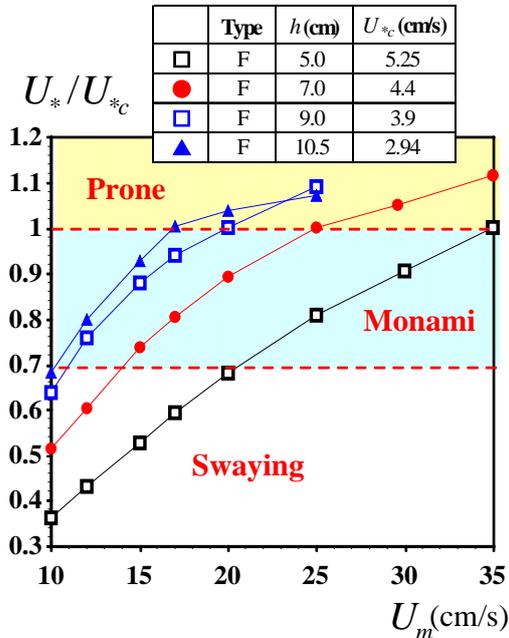


図-4 限界摩擦速度

(5) 組織乱流構造とスカラー輸送に関する成果

植生流れでは植生先端部で組織渦が発達し、乱流拡散への寄与が非常に大きいと考えられる。図-5 (a)に PIV 計測によって得られた瞬間流速ベクトル分布( $\vec{u}, \vec{v}$ )を示す。図-5 (b)は図-5 (a)と同時刻の LIF 法による瞬間濃度  $\tilde{c}$  のコンターを示したものである。染料注入位置は植生先端位置 ( $y_0/h=1.0$ ) とした。計測領域の下流側では低速流の上昇ベクトル *Ejection* によってノズルから注入された染料が植生外部に輸送されている。また計測領域の上流側では高速流の下降ベクトル *Sweep* が発生し、高濃度分布が植生内部に輸送されているのが観察される。これらのことから植生流れでは組織乱流構造の *Sweep*, *Ejection* が交互に発生するような組織変動サイクルが存在し、スカラー量の鉛直方向輸送に大きく寄与することがわかった。

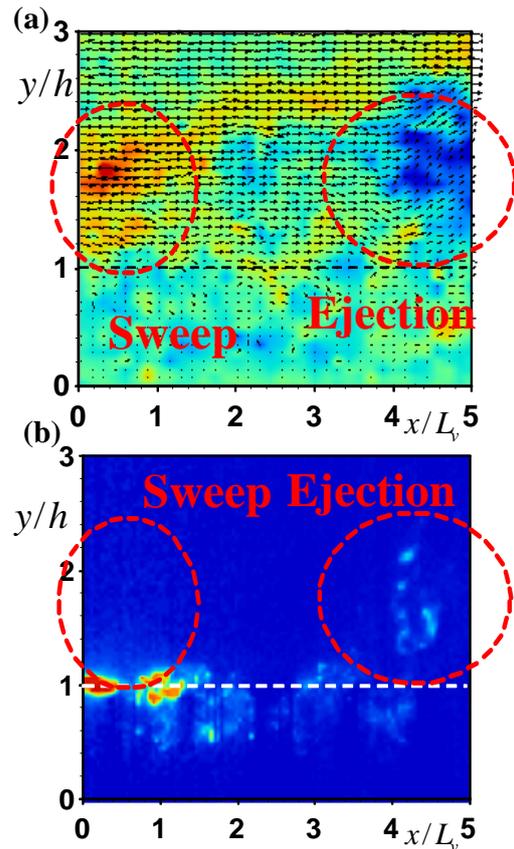


図-5 (a) 瞬間流速ベクトル (PIV 計測), (b) 瞬間濃度分布 (LIF 計測)

(6) 流速・スカラー結合統計量の成果

瞬間濃度と流速の同時計測結果から、速度場とスカラー場の結合統計量であるスカラー輸送フラックスの特性を明らかにした。鉛直方向のスカラーフラックスは植生外部で負値をとり、植生内部で正值をもつことがわかった。これは図-5で考察したように植生内部と植生外部では物質輸送のメカニズムが異なるためである。すなわち、植生内部へは *Sweep* によってスカラー量が植生内部に輸送され、植生外部では *Ejection* によって植生外部に物質が輸送されている。

上記の特性は植生密度が大きなケースで顕著にみられた。これは植生密度が大きなケースでは植生先端部でせん断層が形成され、組織渦によるスカラー量の拡散が促進されるためである。

以上の詳細な実験的研究成果は、2009年刊行の土木学会論文集で発表し、また、2010年には、LES 数値シミュレーション手法でこの妥当性を示し、この成果を *Journal of Hydro-Environment Research* に発表し、高い評価が得られている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- ① Sanjou, M. and Nezu, I.(2011): Turbulent structure and coherent vortices in open-channel flows with wind-induced water waves, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol.11, No.2,113-131. 査読有.
- ② Okamoto, T. and Nezu, I.(2010): Large Eddy Simulation of 3-D Flow Structure and Mass Transport in Open-Channel Flows with Submerged Vegetations, *J. of Hydro-environment Res.*, No.118, pp.1-13. 査読有
- ③ Nezu, I. and Okamoto, T.(2010): Simultaneous measurements of velocity and plant motion in open-channel flows with flexible vegetations, *Environmental Hydraulics*, CRC Press, pp.209-220 査読有
- ④ Sanjou, M. and Nezu, I. (2010) : Energy transfer properties among mean, wave and turbulence components in open-channel flows with wind-induced water waves, *Environmental Hydraulics*, CRC Press, pp.717-722. 査読有
- ⑤ Okamoto, T. and Nezu, I. (2009) : Turbulence structure and “Monami” phenomena in flexible vegetated open-channel flows, *J. of Hydraulic Res.*, Vol.47, pp.798-810, 査読有
- ⑥ 秋谷優・山上路生・禰津家久(2010) : ラングミュアー循環流の3次元構造に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B, Vo.66, No.4, pp.371-383 査読有.
- ⑦ 岡本隆明・禰津家久・山上路生(2009) : 柔軟性を有する植生開水路流れの組織乱流構造と藻波現象に関する実験的研究, 土木学会論文集 B, Vo.65, pp.190-202 査読有
- ⑧ 山上路生・禰津家久(2009) : 風波・開水路混成流における組織乱流渦とエネルギー輸送

動態の解明, 土木学会論文集 B, Vo.65, No.3, pp.203-216. 査読有

- ⑨ Nezu, I. and Sanjou, M.(2008): Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows, *Journal of Hydro-Environment Research*, Elsevier, Vol.2, pp.62-90. 査読有

[学会発表] (計 25 件)

- ① 山上路生, PIV studies on turbulence structure in air/water interface with wind-induced water waves, 第9回 Hydrodynamics 会議, 2010年10月12日, 上海.
- ② 山上路生, Mass transport properties in closed basin with wind-induced water waves, 第8回エコ水理学シンポジウム, 2010年9月10日, ソウル.
- ③ 禰津家久 Flow resistance law in open-channel flows with rigid and flexible vegetation, Riverflow2010 会議, 2010年9月7日 Braunschweig, Germany.
- ④ 山上路生, Coherent turbulence structure generated by wind-induced water waves, Riverflow2010 会議, 2010年9月7日 Braunschweig, Germany.

[図書] (計 1 件)

- ① Nezu, I.他, IAHR Monograph, Flow and Sediment Transport in Compound Channels, (Eds. S.Ikeda and I.K. McEwan), 2009, 333.

[その他]

ホームページ等 <http://www.ce.t.kyoto-u.ac.jp/ja>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

禰津 家久 (NEZU IEHISA)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：30109029

### (2) 研究分担者

山上 路生 (SANJOU MICHIO)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：80362458  
後藤 仁志 (GOTOH HITOSHI)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40243068

### (3) 連携研究者 なし