

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ~ 2010

課題番号：21760385

研究課題名(和文) 風波を伴う開水路流れにおける乱流ダイナミクスと物質輸送プロセスの  
解明研究課題名(英文) Study on mass transfer process and turbulence structure in  
open-channel flows with wind-induced water waves

研究代表者 山上 路生(Michio Sanjou)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362458

## 研究成果の概要(和文):

本研究では風波を伴う開水路流れの乱流構造について、流れが在る場合と湖沼のようなタンク状態の場合のそれぞれについて、可視化計測をもとに現象解明を行った。前半では主に鉛直2次元構造に焦点をあて、平均流・乱れ・波の3者間のエネルギー輸送動態プロセスや組織乱流の生成に与える波動の影響を定量評価した。後半では流れの3次元構造に着目した。特にラングミュア循環流形成に関わる支配的パラメーターや循環流が流れ場に及ぼす影響を解明した。この解明にあたって、3台の高速度カメラを同期させるマルチカメラ可視化システムの開発した。このシステムではステレオ PIV により横断面における流速全3成分を計測するとともに、水面形状も画像情報より同時に評価することができる。この画期的な計測手法によって、循環流と波の位相関係、水路アスペクト比と循環流の生成特性の詳細が定量的に解明できた。

研究成果の概要(英文): When wind appears over the free-surface flows such as actual rivers and artificial channels, a significant velocity shear and water waves are generated near the air/water interface. It is inferred that coherent turbulence structure such as hairpin vortex in the near-wall region is also influenced by these interfacial fluctuations. However, a lot of uncertainties remain about the wind effects on wall-turbulence structure. In the first stage of the present study, PIV measurements were conducted in open-channel flows under the wind flows in order to reveal the effects of interfacial free-surface condition on coherent turbulence structure and energy transfer process in the inner and outer layers. Wind-induced water waves observed in natural lakes and ocean cause secondary currents called as Langmuir circulation. In the second stage, all three velocity components could be measured simultaneously by the stereoscopic PIV technique. The present multi-camera system allowed us to investigate the phase relation between the surface fluctuation and the velocity components, effects of aspect ratio on formation properties of Langmuir circulation and so on.

## 交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000円	630,000円	2,730,000円
2010年度	1,200,000円	360,000円	1,560,000円
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000円	990,000円	4,290,000円

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：水工水理学

キーワード：風波現象，マルチカメラ・ステレオ PIV，乱流計測，組織乱流構造，3次元構造

## 1. 研究開始当初の背景

従来型の土砂水理学では水面変動，とりわけ波動に起因する乱流変動の影響については考慮されなかったが，水深が比較的小さな流れでは底面境界層の構造や土砂などの物質輸送を大きく変化させることが予想される．このような背景から風波開水路流れの乱流ダイナミクスに関する研究は学術的な価値だけでなく，洪水河川の最適管理や水域環境の保全などの実務においても重要なテーマだと確信した．さらに申請者は風波植生研究で培った乱流計測技術を用いれば，誰もトライしていない，「風波・開水路混成流における組織乱流の3次元構造と物質輸送への寄与特性」の実験的解明ができないかと思いついた．底面境界層における組織乱流構造と風波現象については別々に発展しており，2つをジョイントする研究はまだ少ない．そこで本研究ではこの状況をブレークスルーするために，申請者のこれまでの経験と実績に基づいて，自由水面の波動が組織乱流渦の生成・発達・輸送に与える影響，波と乱れのエネルギー供給特性および波動場における乱流輸送メカニズムをターゲットとし，これらを高精度計測システムによって解明する次第である．

## 2. 研究の目的

流体现象は様々な工学およびその他の科学分野で扱われ，我々の生活とも密着するものである．その中でも自由水面の影響や波，およびそれらが引き起こす諸現象の解明は水理工学に求められる最重要課題である．これは機械工学や理化学などその他の流体研究分野ではほとんど扱われない水工学の専門領域である．これらの重要性は世界中の水工研究者および技術者の共通認識であり，本プロジェクトの全体構想もこの一環にある．しかしながら，風波開水路流れの3次元構造に関する研究が進展しないのは，水深変動によって境界条件が時空間変化するために，流れの解明にはきわめて重要な水面近傍領域の高精度計測が困難だからである．特にレーザー流速計による3成分乱流計測は，レーザー光の照射制約のため非常に難しい．また単層のレーザーライトシートを用いる標準型PIVでは，単層平面上の流速計測は可能であるが3次元領域の同時計測はできない．したがって環境水理で求められる乱流輸送現象の解明にはほど遠いのが現状である．そこで本研究はこれまでの経験と技術の下で，流速3成分と界面形状を同時に計測する画期的な計測装置を開発し，風波開水路の乱

流構造や3次元の流れ構造を解明する．

## 3. 研究の方法

### (1) 風波・開水路混成流における組織乱流構造の解明

流速勾配，すなわちシアが存在する乱流境界層では，ヘアピン形状をもつ組織乱流渦が発生することが知られている．TS波とよばれる不安定挙動が発達するとヘアピン渦になり，さらにエジェクションによってヘアピン渦は上方へ輸送されるが，乱流斑点を伴って崩壊する．このような渦のライフサイクルが存在することが非常に興味深い点であり，この時間特性は点計測法による統計解析では隠れてしまうため，研究進展が遅れた．最近では可視化ハードウェアの飛躍的な性能向上によってその構造が定量評価されつつあり，再び脚光をあびているホットな話題である．

渦を視覚的に抽出することは比較的容易だが，得られたデータから数学的に抽出することは単純ではなく，Q値法およびといった様々な数学手法が提案されている．これらの方法を比較しながら本研究の瞬間流速データに適用して，ヘアピン渦の時間空間構造を解析する．自由水面にも組織渦構造が発生することがいくつかの研究グループでは報告されているが，いずれも定性的なもので具体的な構造は未解明である．そこで底面と水面におけるそれぞれの渦構造を特徴づける長さスケールや時間スケールを定量評価する．これによって3次元の全体形状の時間変化が数値シミュレーションのようにアニメーション化できることが本研究の目玉である．これらの結果から風波開水路における乱流組織渦の現象モデルを構築する．

### (2) 風波における3次元流れ構造の解明

上記(1)の課題は主に鉛直2次元現象を対象とした．3次元的に現象を見る場合，ラングミュア循環流のような風波固有の2次元流が無視できない．ラングミュア循環流は鉛直方向の質量・運動量交換だけでなく水平方向の分散特性と大きな関連を持つ．したがって海洋や湖沼などの水域環境を考える上で非常に重要なトピックである．縦渦セルによって界面や底面で浮遊物，ガスおよび土砂の集積する領域（convergence領域）が現れる．このような流体现象が発生した場合のガス輸送を考えるには従来の1,2次元的なアプローチでは限界があり，特にconvergenceおよびdivergence領域との関係を明らかにする必要がある．特に上述のように発生メカニズムも含めてラングミュア循環流の流体力学的特性にはまだ正確な知見が得られてお

らず、その解明が急がれる。本研究では3台の高速 CMOS カメラを同時制御して大規模循環流の立体構造を計測できるシステムを開発する。2台のカメラを流速計測用、1台を気液界面の境界判別用使用する。これによって循環流の位相特性や形成機構が実験的に解明できる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 風波・開水路混成流における組織乱流構造の解明

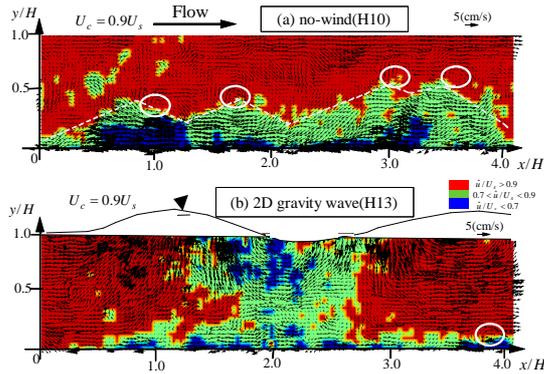


図-1 主流速の3層コンター表示 (a: 無風ケース, b: 2次元重力波ケース)

図-1 に瞬間流速の空間構造を、高速層 ( $u/U_s > 0.9$ )、中速層 ( $0.7 < u/U_s \leq 0.9$ ) および低速層 ( $u/U_s \leq 0.7$ ) に分けてにカラーコンター表示した。無風ケース(H10)と2次元重力波ケース(H13)を対象にしたが、比較のために表面流速値 ( $U_s$ ) は H10 のものに統一してある。無風ケースでは高速層と中速層の境界線上にヘアピン渦のヘッド(白色サークル)が現れ、レッグ部は中速層に存在することがわかる。また低速層を中心に強いエジェクションがみられ、組織渦の代表的な構成要素がそれぞれの運動量をもって輸送される。このため組織渦は時間とともに歪められてその形状が変化する。また既往研究で指摘されているように高速層と中速層の境界ラインはテント状に分布し、様々な発達段階のヘアピン渦が混在してパケットを構成する様子がみられる。一方2次元重力波ケースでもヘアピン渦のヘッド部が高速層と中速層の境界に現れるが、高速層の分布が波のアップダウンの影響を大きく受けて底面近傍まで現れるタイミングと低速層の分布が水面近くまで現れるタイミングが発生する。このように各層が大きく鉛直方向に運動するため、風波発生状態では無風状態ほどヘアピン渦が十分に発達しないと考えられる。実際にさざ波ケースや2次元重力波ケースでは無風ケースでみられたようなパケット構造を確認できなかった。

##### (2) 風波における3次元流れ構造の解明

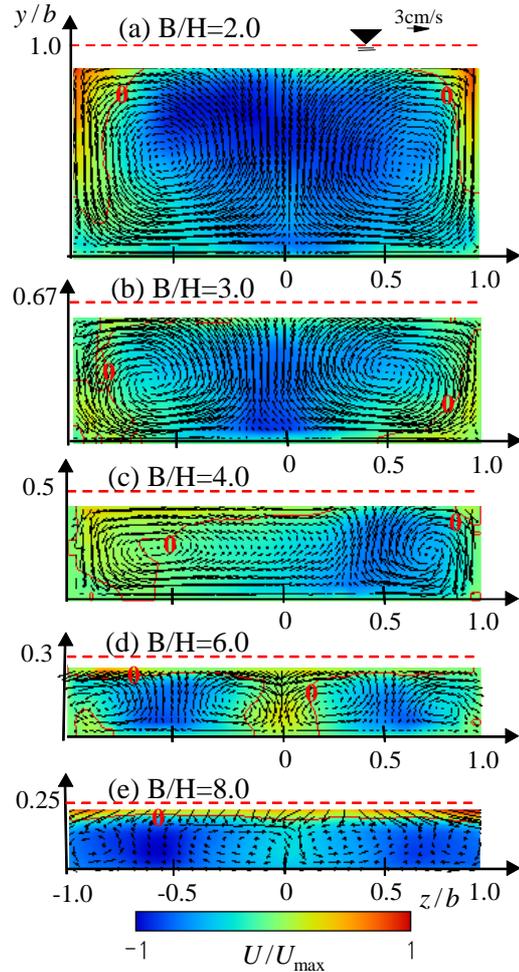


図-2 時間平均流速の横断面分布, コンターは主流速

図-2(a) ~ (e) はアスペクト比の変化で比較した横断面の時間平均流分布を示す。流速は平均流横断ベクトル ( $V, W$ ) とコンターは平均主流速  $U$  を、断面内の主流最大値  $U_{max}$  で無次元化した3成分を示した。またここではトラフよりも下部の領域 ( $y/H < 0.9$ ) をターゲットにした。これら5ケースに共通する特徴として、水面付近で横断流速  $W$  が発散する divergence 域では  $U$  が低速で、上昇流を伴う一方で水面付近で  $W$  が収束している convergence 域では  $U$  は divergence 域より大きく、下降流が発生することがあげられる。このように水深(アスペクト比)を変化させても、高速ストリーク領域では下降流が、低速ストリーク領域では上昇流が観察されるが、これは既往研究と一致する。アスペクト比  $B/H = 2$  のケースに注目すると、流れ場がほぼ左右対称で、2つの循環セルが見られ、対を成すことが確認できる。循環セルの向きが開水路のコーナー2次流と逆になる点が興味深い。アスペクト比がさらに大きい

$B/H=3$  でも類似の分布がみられる。アスペクト比が比較的大きい  $B/H=6$  や  $8$  のケースでは循環セルの数が  $4$  つに増加する。循環セルが  $2$  つの小アスペクト比ケースでは、センターライン ( $z/b=0$ ) で低速ストリークが、両側壁 ( $z/b=-1, 1$ ) で高速ストリークが見られるが、循環セルが  $4$  つになると、センターラインでは高速ストリークとなり、これらのストリークの数も増加する。 $B/H=4$  では  $2$  つの循環セルが確認できるが、 $B/H=2$  や  $3$  と比べると渦中心は側壁にシフトする。さらに左右非対称の構造となり、水面近傍における上昇流を伴う低速ストリーク領域はセンターラインから  $z/b=0.5$  付近へずれて発生する。この結果より  $B/H=4$  では循環セルの構造が変化する遷移状態といえる。これよりもアスペクト比が大きくなるにつれてセンターラインを中心に新たな渦ペアが発生するものと予想される。サンプリング時間を増加させると対称形になるかもしれず、この点については今後検討したい。

#### 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6件)

Sanjou, M. and Nezu, I.: Turbulent structure and coherent vortices in open-channel flows with wind-induced water waves, *Environmental Fluid Mechanics*, Vol.11, No.2, pp.113-131, 2011. (査読有)

秋谷優・山上路生・禰津家久：ラングミューアー循環流の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.371-383，2010. (査読有)

Sanjou, M., Nezu, I. and Toda, A.: Coherent turbulence structure generated by wind-induced water waves, *Proc. Riverflow2010, Braunschweig*, pp.1673-1680, 2010. (査読有)

Sanjou, M., Nezu, I. and Akiya, Y.: Mass transport properties in closed basin with wind-induced water waves, *Proc. 8<sup>th</sup> ISE, Seoul*, pp.846-851, 2010. (査読有)

Sanjou, M. and Nezu, I.: Energy transfer properties among mean, wave and turbulence components in open-channel flows with wind-induced water waves, *Proc. 6<sup>th</sup> ISEH, Athens*, pp.717-722, 2010. (査読有)

山上路生・禰津家久：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.203-216，2009. (査読有)

[学会発表](計4件)

Mass transport properties in closed basin with wind-induced water waves, *8<sup>th</sup> International Symposium of Ecohydraulics, Seoul*, 2010年9月韓国 (2010.9.14 口頭発表)

Coherent turbulence structure generated by wind-induced water waves, *Riverflow2010, Braunschweig*, 2010年9月ドイツ (2010.9.9 口頭発表)

Energy transfer properties among mean, wave and turbulence components in open-channel flows with wind-induced water waves, *6<sup>th</sup> ISEH, Athens*, 2010年6月ギリシャ (2010.6.23 口頭発表)

Coherent Structure in Interfacial Shear Layer with Wind-Induced Water Waves, *17th APD-IAHR Congress, Auckland*, 2010年2月ニュージーランド (2010.2.22 口頭発表)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ce.t.kyoto-u.ac.jp/ja/information/laboratory/hydraulic>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

山上 路生 (Michio Sanjou)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：80362458