

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究 B

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23760458

研究課題名（和文） 植生帯を有する開水路エコフローにおけるガス交換・乱流輸送プロセスの解明

研究課題名（英文） Gas exchange and turbulent transport in vegetated open-channel flows

研究代表者

山上 路生（MICHIO SANJOU）

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80362458

研究成果の概要（和文）：河川流のような開水路乱流における水面を介するガス交換にフォーカスし、滑面と剛体植生粗度の二つの底面境界を用意し、室内実験水路にて乱流計測および溶存酸素の計測を行った。特に同じ流量および水深の場合、滑面よりも植生流れの方が大規模な混合渦の生成によって界面流速発散強度が増加するためガス輸送が促進され、さらにガス輸送速度と植生密度には重要な関係が存在することが示された。ガス輸送速度は界面流速発散値に大きく依存することが確認できたが、界面流速発散モデル（SD モデル）では水深の影響を考慮できないため開水路流れのガス輸送をモデル化するには不十分である。そこで SD モデルにガス輸送現象の支配因子と考えられる界面乱れエネルギーと水深スケールを組み込み、滑面流れと剛体の水没植生流れの双方にも適用できる一般性の高い修正 SD モデルを開発した。

研究成果の概要（英文）：We conducted turbulence and DO measurements in laboratory flume, in which two kinds of bed conditions were chosen, i.e., smooth and vegetation roughness conditions. It was found that the vegetation promotes the gas transfer beneath air / water interface, because a larger surface velocity divergence is induced by a large - scale shear vortex formed in the vegetation edge. Further, we revealed a great dependency of the gas transfer on the vegetation density. Based on the measured results, a new surface divergence model was developed which can predict successfully the gas transfer velocity in the open-channel flows for the both of the smooth and vegetated bed conditions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：開水路流れ、ガス輸送、植生流れ

1. 研究開始当初の背景

植生生態は酸素、二酸化炭素、窒素などの溶存ガス物質と密接な関わりをもっており、これらのガスは自由水面を通じて常時大気と交換されている。このような背景から植生開水路流れのガス輸送特性の解明は河川環境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。さらに申請者は植生開水路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、「植生開水路エコフローにおける組織乱流構造と水・空気界面におけるガス交換輸送への寄与特性」の実験的解明ができないかと思いついた。そもそもこのテーマに関する研究の遅れの原因としては、組織乱流渦の研究が自由水面の影響を考慮しない壁面境界層や乱流混合層を中心に発展してきたことが挙げられる。すなわち自由水面のガス交換現象と植

生乱流の組織構造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ほとんど皆無である。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、研究代表者の山上のこれまでの経験と実績に基づいて、植生開水路流れの組織乱流渦の生成・発達メカニズム、それらの自由水面領域での挙動特性および界面ガス交換/溶存ガス輸送に与える影響をターゲットとし、これらを高精度計測システムを駆使して実験的に解明する。

2. 研究の目的

本研究では単体の高速度カメラにロータリー式のフィルタ回転装置を同期させてPIVとLIF手法による流速と溶存ガス濃度の同時計測を行う。山上は2年前分光回転ユニットとメガピクセルの高速度カメラを同期させた3次元のスキャニングPIVシステムを開発済みであり、ここでのノウハウを計測システムの開発に生かす。なお申請者のPIVシステムはLDAによる精度検証済みであり可視化計測による乱流の空間構造の解明への糸口を見出しており、ガス輸送への底面バースト渦や自由水面の乱流構造の寄与特性の解明が期待できる。研究初年度は水面形判定のための専用カメラを併用して、水面極近傍の乱流構造とガス輸送プロセスの計測を可能とする。これにより従来の数値計算や乱流計測では解明が困難であった、開水路流れにおける組織乱流およびマイクロ渦によるガス輸送機構を詳細に考察できる。さらに2年目では本研究の最重要トピックである植生開水路流れのガス輸送プロセスへ研究発展させ、次の未解明課題を鋭意研究する。

- ・ 滑面開水路と植生開水路流れのガス輸送特性の比較
- ・ 植生キャノピー境界で生成する大規模せん断渦の自由水面におけるガス交換プロセスへの寄与特性の解明
- ・ 藻波の波動・乱れの相互作用およびガス輸送動態に与える影響の解明
- ・ 植生効果を考慮した界面ガス交換速度の新しいパラメタリゼーションと物理モデルの提案

研究期間終了後も風波開水路混成流へ拡張させて風波と底面粗度乱流のカップリング効果がガス輸送に与える影響の定量的な解明に取り組み、全体構想を完結できるよう最大限努力する。

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ろう。同時に河床水理現象、特に植生の影響は環境河川

を維持管理する上で非常に重要な水工学の専門トピックである。しかしこれらの研究分野は独立に発展してきたため、植生流れにおけるガス輸送特性、キャノピー領域へのガス滞留特性について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るものの、現段階では全く手つかずの未開の分野である。そこで山上は、この次世代の研究課題のバイオニアになりたいと強く願っている。その実現には新しい計測システムの開発がぜひとも必要である。本研究はこれまでの経験と技術の下で、組織乱流構造と溶存ガス濃度を同時に計測する画期的な計測装置を開発し、植生エコフローの乱流ガス輸送という未解明課題に挑戦する独創的な研究である。これらの成果が得られれば、全体構想に掲げた植生河川におけるガス交換輸送メカニズムに関する研究促進への突破口になり、水工学の発展に大きな寄与となることを確信する。

3. 研究の方法

研究初年度ではフィルタ回転装置による流体・溶存炭酸ガス濃度の同時計測システムを開発し、滑面開水路流れにおける界面ガス交換に及ぼす底面バーストの影響を解明する。本システムではガスフラックスを渦相関法によって高精度に評価でき、開水路流れにおけるガス交換速度のパラメタリゼーションを検討する。本研究プロジェクトのメインは植生を有する開水路流れのガス輸送現象であるが、シンプルな滑面開水路流れにおいても組織乱流構造によるガス輸送特性についてはほとんど解明されておらず、まず比較のためにここから研究をスタートさせる。このエコ水理に関するホットな話題は多くの研究者の関心を集めているにも関わらず、研究進展が遅れているのが現状である。従来型の接触式ガス濃度センサーでは流れ場を乱すためマイクロな乱流ガス輸送現象を捉えることができず、このような計測技術の制約が研究遅延の原因であると考えられる。さらにガスフラックスを正確に計測するには流速と溶存ガス濃度を同時に計測する必要がある。代表者の山上は2年前にレーザー誘起蛍光法を応用した2台のカメラを用いたPIV/LIFシステム（それぞれのカメラをPIV用、LIF用として制御）のプロトタイプを開発して国際シンポジウム Riverflow2008(トルコ)で発表した。その際にLIFによるガス輸送研究の世界権威であるカールスルーエ工大の故 Jirka 教授から高精度LIFの実現のためには、ぜひとも1024階調をもつ10ビットカメラを使用するのが望ましいと助言を受けた。そこで本助成金によって10ビットの高速度カメラを購入して輝度階調の高分解能化をはかる。また2台のカメラを用いる場合、これらの視野の

対応づけが必要であるが、このわずかな空間誤差がガス輸送フラックス評価の著しい低下を招くことも指摘された。そこで本研究では高速フィルタ回転装置を用いて1台のカメラで高精度なPIV/LIF計測を実現する。ガス濃度のLIF計測には2色蛍光法を用いる。本研究では二酸化炭素を実験ガスとするが、酸素や窒素なども同じ弱溶解性ガスなので本研究結果はこれらのガス輸送プロセスにも援用できる。レーザーライトシートを照射するとpHによって発光強度が変化するウラニンと変化しないローダミンを水中に溶解させておく。ウラニンとローダミンの発光波長のそれぞれに対応した2種のバンドパスフィルタによってこれらの輝度分布データが得られる。2色蛍光法ではこれらの相対評価より高精度なpH分布を求めることができる。溶存炭酸ガス濃度とpHには対応関係があるため炭酸ガスの濃度がpH画像より計算できる。フィルタ回転装置には4つのフィルタが付いており、このうち2つはPIVトレーサの反射光のみ透過させるフィルタであり、残りの2つはウラニンとローダミンそれぞれの発光波長のバンドパスフィルタである。これを最新鋭のサーボモータによって100~500Hzの回転数で制御し、ほぼ同時にPIV用とLIF用のそれぞれの画像を得ることができる。またPIVとLIFの画像の視野が全く同一であるため、2台のカメラを用いる方法のようなPIV/LIF法で問題となる空間位置誤差は全く発生しないメリットがある。

2年目では本プロジェクトの最重要トピックである植生エコフローにおけるガス交換輸送機構を解明する。実際の植生は揺動し周期的な藻波運動が発生することが知られており、流速場とガス濃度輸送は藻波運動の位相に大きく依存する。位相解析を濃度変動データにも適用して、流速の位相変動特性との比較を行うことで、滑面開水路や剛体植生フローとのガス輸送特性の差異が定量的に評価できる。これらの一連の研究により、植生開水路流れにおける組織乱流渦と炭酸ガス輸送プロセスを明らかにし、植生パラメータを考慮した河川植生水域におけるガス交換式を提案する。

4. 研究成果

本研究は滑面および底面に植生粗度を有する開水路乱流におけるガス輸送現象を対象とした。界面流速の発散値をベースにしたSDモデルの適用性を検証するとともに、乱れ統計量を用いた修正SDモデルを提案した。水深、流速だけでなく底面条件が異なる水理条件下においても、ガス輸送速度を1つの線形ラインで表すことに成功した。以下に得られた結果をまとめて示す。

- 1) 水平面PIV計測によって界面流速発散値の瞬間値を得た。瞬間構造の中には正負のパターンが時間とともに流下する様子が観察され、ボイル現象と類似の特性が確認できた。
- 2) 滑面流れでは界面流速発散値は水深の影響はほとんどないが、水面の主流速には大きく依存することがわかった。また植生流れでは植生先端のレイノルズ応力値に対応して発散強度が増減することが明らかになった。このことは植生せん断層で形成される大規模渦が水面の乱れに大きな影響を与えることを意味する。
- 3) 従来のSDモデルでは比例定数が水深依存することがわかった。そこで水深効果を導入した修正SDモデルを開発した。速度スケールには水面流速と水面乱れエネルギーを与えたが、両者ともに比例定数は水深や流速への依存性はみられず有用なモデルであることが示された。
- 4) 上述のモデルを植生流れに適用したところ、速度スケールに水面流速を与えた場合には、植生ケースは滑面ケースから大きく乖離した。一方で速度スケールに乱れエネルギーを与えた場合には、底面の粗滑に関わらず、比例定数は一つに決まり、表面更新率を乱れエネルギー、水深および界面流速発散強度で表した修正SDモデルは植生のような大規模な粗度要素をもつ流れに対して、滑面と同じ取り扱いができることが示された。

本プロジェクトでは室内計測を中心としたが、得られた修正SDモデルのスケール相似性を調べるために、実河川も含めたより多くの水理条件における適用性を検討していきたい。特に植生については水没且つ剛体という限られた条件であるため、かぶり水深や植生変形の影響についても重要な課題である。また射流のように水面変動が大きい流れ場に対しては本研究で用いたシングルカメラのPIVでは界面流速発散値の計測ができないため、この点についても継続研究したい。

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)

(1) 山上路生・岡本隆明・禰津家久・村田祐樹：植生開水路流れの自由水面ガス輸送現象における界面流速発散モデルの開発，土木学会論文集 B1, Vol.68, No.3, pp.148-158,

2012 (査読有)

(2) 山上路生・禰津家久・鈴木壮平・池内三津喜：ワンド床の勾配が水理特性と乱流物質輸送に与える影響に関する基礎的研究，土木学会論文集 B1, Vol.68, No.2, pp.60-102, 2012. (査読有)

(3) 山上路生・禰津家久：開水路乱流における自由水面の流速発散とガス輸送に関する実験的研究，水工学論文集，Vol.56, pp.1297-1302, 2012. (査読有)

(4) Sanjou, M. and Nezu, I.: Development of Surface Velocity Divergence Model for Gas Transfer Phenomena in Open-channel Flows, Proc. of 2nd IAHR Europe Congress, Munich, on USB-Memory, 2012. (査読有)

(5) Sanjou, M., Nezu, I. and Komatsu, T.: Hydrodynamic relation between surface velocity divergence and gas transfer process in open-channel turbulence, Proc. of IAHR-APD 2012, Jeju, on USB-Memory, S4B-3, 2012. (査読有)

(6) Komatsu, T., Sanjou, M., and Nezu, I. : Langmuir circulation effects on gas transfer in wind-induced water waves, Proc. of IAHR-APD 2012, Jeju, on USB-Memory, PS4-3, 2012. (査読有)

[学会発表] (計 1 件)

[開水路乱流における自由水面の流速発散とガス輸送に関する実験的研究] 第55回水工学講演会、2012年、3月5日、愛媛大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：