

第II部門 植生開水路流れにおけるガス輸送モデルに関する研究

京都大学	学生員	○鈴木健吾
京都大学	正会員	山上路生
京都大学	学生員	高橋和矢
京都大学	フェロー	戸田圭一

表-1 実験条件

CASE	λ	U_m (cm/s)	U_s (cm/s)	U^* (cm/s)	H (cm)
Veg-A1	0	10.0	11.6	0.5	15
Veg-A2		20.0	22.3	1.0	
Veg-B1	0.0236	10.0	12.1	0.8	
Veg-B2		20.0	23.4	1.7	
Veg-C1	0.0947	10.0	12.3	1.3	
Veg-C2		20.0	23.8	2.5	
Veg-D1	0.3789	10.0	14.0	1.9	
Veg-D2		20.0	28.6	3.8	

1. はじめに

界面を介するガス輸送は河川水質の保全や温暖化対策に大きな影響を及ぼすことが考えられ、古くから鋭意研究が行われてきたトピックである。ガス輸送速度は流れ場の様々な条件によって変化し、底面形状の違いによってもガス輸送速度の変化は見られるため、その特性は知ることは難しい。

ガス輸送速度のモデリングは古くから行われている。界面流速発散強度を用いた代表的なモデルに SD model¹⁾があるが、このモデルは底面形状や水深によって変化する乱流構造の影響が考慮されていない問題がある。そこで山上ら²⁾は SD model をベースとして水深効果を考慮した新たなモデルを提案した。しかしこの修正モデルは検証実験ケース数が不十分であり適用性に不安が残る。そこで本研究においては植生流れ場における界面流速発散強度とガス輸送係数の関係を調べ、修正 SD モデルの適用性について検討を行った。

2. 実験手法および水理条件

図-1 は本実験の装置図である。水路部の幅は40cm、長さは10mである。界面流速発散を求めるための流速計測には PIV 法を用いた。水面高さにおける PIV 計測については、カメラで完全にクリアに撮影できる高さにレーザーシート(LLS)を照射した。これは1mm水面より下方になるが、この位置を水面とした。トレーサー粒子を水流中に注入し、LLS によって可視化された粒子群を水路上方に固定した高速度カメラで連続撮影した。フレームレートは流速によって200Hzと500Hzに変化させたが、サンプリングレートはパルスジェネレータを用いて全ケースとも30Hzとした。各ケース撮影領域を変えて S-HPIV と L-HPIV という2通りの撮影を行った。S-HPIV は高精度計測を考慮して撮影領域を9cm×9cm、PIV 解析の相関窓のサイズを3.3mm×3.3mmとした。L-HPIV は水路幅方向の流体運動の分布を調べるため撮影領域を30cm×30cm、相関窓サイズを7.5mm×7.5mmとした。界面流速発散値は、対象ポイントの周囲点における流速成分を用いて中心差分で数値微分した。

ガス輸送速度を測定する実験についても、同一の水路を用いた。水路内には酸素濃度計(TOADKK DM-32P)を上流側と下流側に9m間隔で設置し、水中の溶存酸素濃度を計測した。水路中に無水亜硫酸ソ

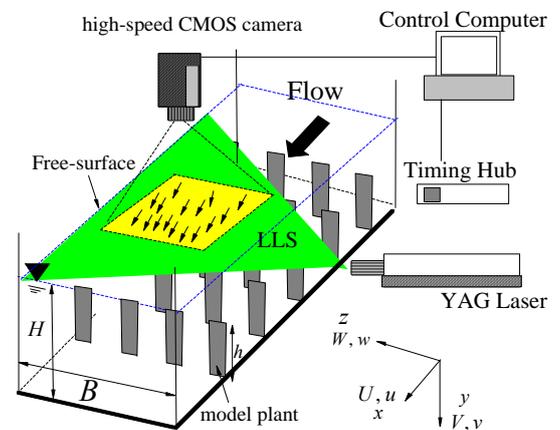


図-1 実験システムと座標系

ーダを十分に混入して無酸素状態にしたのち、飽和濃度に達するまで酸素濃度を計測した。出力信号は300秒ごとにロガー(mini LOGGER GL220)に記録した。

座標系は流下方向が x 軸、鉛直方向に y 軸、横断方向に z 軸を設定した。y 軸の原点 y=0 は水空気界面とした。U, V および W はそれぞれ x, y, z 方向の時間平均流速を、u, v および w は瞬間流速の時間平均からの偏差を表している。H は水深、 λ は植生密度である。植生密度 λ は既往研究²⁾にならって次式で定義した。

$$\lambda = \frac{nhb}{S} \quad (1)$$

S は路床面積、n は面積 S 中の植生の総数である。植生は高さ h=5cm、幅 b=0.8cm、厚さ 1mm のものを用いて正方格子状に配置した。本研究ではガス輸送速度を求めるにあたり、温度調整に特に気をつけなければならないため、水温が 20°C になるようエアコンを用いて室温をコントロールした。

表-1 は実験条件を示す。水深 H は植生高さ h の 3

倍の 15cm とし、かぶり水深比が十分大きいため水面変動は発生しなかった。 U_m は断面平均流速， U_s は水面流速， U^* は摩擦速度である。植生密度は $\lambda=0, 0.0236, 0.0947, 0.3789$ に設定した。それぞれの λ の値に対して U_m を 10cm/s と 20cm/s の 2 通りに設定し計 8 ケースの実験を行った。

3. 結果と考察

図-2はL-HPIV計測によって得られた横断平均流速 W の横断方向分布である。滑面ケースではセンターラインを境に2次渦の発生が確認でき、植生ケースでは複数の2次渦が確認できる。この2次渦によって主流速、界面発散強度 β' の横断方向への拡散も確認できた。

図-3はS-HPIV計測で得られた界面流速発散と渦度の絶対値差の時空間分布の一部である。絶対値差が特に大きな部分(赤及び青丸)に着目すると正負のコンターが時刻とともに移流する様子がみられた。

図-4は断面平均流速 U_m を変化させた時のガス輸送速度 k_L と植生密度 λ の関係を示す。ガス輸送速度 k_L は U_m や λ とともに増加し、この傾向は流速発散強度 β' や水面の乱れエネルギー k_s にも見られることから、乱流構造がガス輸送速度に大きく影響するといえる。つまり、植生によって大規模なせん断渦が形成されてこれによりガス交換が促進されるといえる。

界面発散(SD)モデルは、ガス輸送速度 k_L が界面発散強度と分子拡散係数 D の積の1/2 乗に比例するものである。式(2)はMcCreadyら¹⁾のSD modelを示す。

$$k_L = \alpha \sqrt{D\beta'} \quad (2)$$

SD modelを実用化する場合、比例定数 α が流れ場の各条件に依存することが指摘されている。そこで山上ら²⁾は実河川のPIVで得られる水理量と水深で表すことができるガス輸送の修正SD modelとして式(3)を提案した。

$$k_L \propto \sqrt{D \frac{H}{k_s^{1/2}} \beta'^2} \quad (3)$$

図-5は式(3)を検証したもので、植生流れ場の実験結果において線形関係がみられた。またグラフの傾きから修正SD modelにおける比例定数 α は0.151と算出され、既往研究の実験結果²⁾ともよく一致する。この結果から、本修正モデルの普遍性が期待される。

4. おわりに

本研究では植生流れ場における界面流速発散とガス輸送速度について考察を行い、これらの特性を

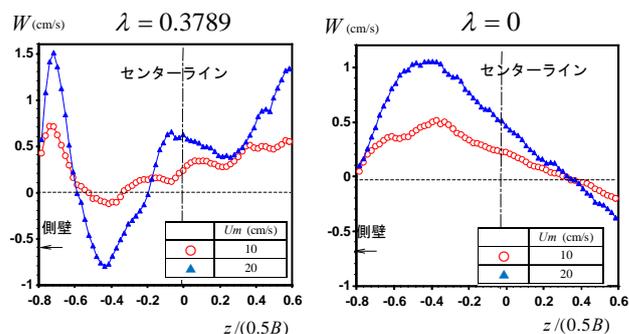


図-2 $\lambda=0, 0.3789$ の時間平均横断流速 W の横断方向分布

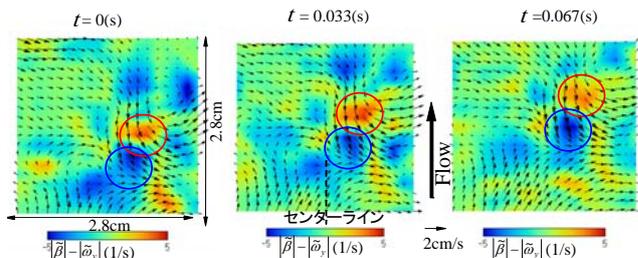


図-3 $\lambda=0.0947, U_m=10\text{cm/s}$ の瞬間ベクトルの時系列

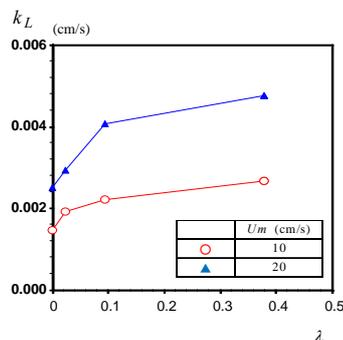


図-4 ガス輸送速度と時間平均表面流速の関係

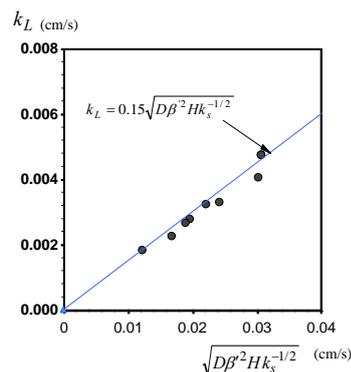


図-5 修正 SD model の検証結果

明らかにした。さらに既往の修正SDモデルが植生流れ場にも適用できることを示した。

参考文献

- 1)McCready et al. "Computer simulation of turbulent mass transfer at a mobile interface", *AIChE Journal*, 32, 1108-1115, 1986.
- 2)山上・岡本・福津・村田：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, pp.148-158, 2012.