

京都大学 学生員 ○後藤慎弥  
 京都大学 正会員 山上路生  
 京都大学 学生員 田中優太  
 京都大学 正会員 戸田圭一

表-1 実験条件

	$h$ (cm)	$\phi$	$H$ (cm)	$H/h$	$U_m$ (cm/s)	$U_s$ (cm/s)
Case 1-1	1.5	0.0	12.0	8.0	5.0	7.0
Case 1-2					10.0	13.3
Case 1-3					20.0	24.3
Case 2-1	3.0	0.0	12.0	8.0	5.0	7.4
Case 2-2					10.0	14.7
Case 2-3					20.0	26.6
Case 3-1	5.0	0.0	12.0	8.0	5.0	7.1
Case 3-2					10.0	13.3
Case 3-3					20.0	27.3
Case 4-1	8.0	0.0	12.0	8.0	5.0	6.0
Case 4-2					10.0	14.2
Case 4-3					20.0	32.3
Case 5-1	12.0	0.0	12.0	8.0	5.0	7.2
Case 5-2					10.0	14.8
Case 5-3					20.0	29.9
Case 6-1	16.0	0.0	12.0	8.0	5.0	7.3
Case 6-2					10.0	13.8
Case 6-3					20.0	30.7

1. はじめに

気液界面を介するガス輸送は水域環境や水質に大きな影響を及ぼすことが考えられ、地球温暖化、水環境、水性生態系への影響といった環境問題と密接するきわめて重要な研究トピックである。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 model<sup>1)</sup>があるが、このモデルは底面形状や水深の変化が考慮されていない問題がある。そこで山上ら<sup>2)</sup>は SD model をベースとして植生流れ場に適用できる新たなモデルを提案した。植生流れ場における界面流速発散強度とガス輸送速度の特性を明らかにし、二値間に強い相関性を見出した。透過・不透過の違いはあるものの棧粗度流れ場においても同様の特性が予想される。そこで本研究では棧粗度を有する開水路流れにおける界面流速発散強度とガス輸送速度の関係を明らかにし、さらに棧粗度流れに適用できるガス輸送速度のモデル式を検証する。

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。図-1 のように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。撮影領域のサイズは 9cm×9cm で PIV 解析の相関窓サイズは 3mm×3mm 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ーダを十分に混入して無酸素状態にしたのち、飽

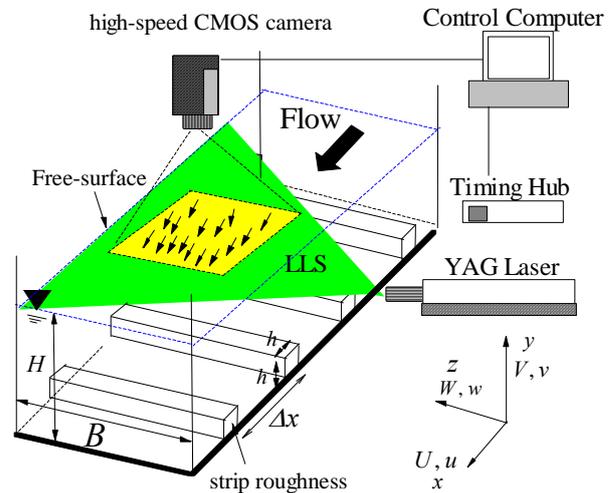


図-1 実験システムと座標系

和濃度に達するまでの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  $y=0$  は水路床とした。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、h は粗度高さ、 $\lambda$  は粗度間隔である。粗度間隔  $\lambda$  は粗度の上流端から次の粗度の上流端までの長さを表す。水路底面には約 10m にわたって棧粗度模型を貼り付けた。なお計測は流れが十分発達していると考えられる最上流の棧粗度から約 5m 下流で行った。棧粗度には、1.5cm×1.5cm (=h) の正方形で、幅が 40cm の木材を使用し、粗度間隔  $\lambda$  を系統変化させて実験を行った。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かったため、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 12cm でかぶり水深比が十分大きいいため、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、 $\phi = \lambda/h$  で無次元粗度間隔である。粗度間隔  $\lambda$  を変化させ  $\phi = 3.0, 5.0, 8.0, 12.0, 16.0$  に設定した。また、 $\phi = 0$  は滑面条件を意味する。それぞれの  $\phi$  の値に対し  $U_m$  を 5cm/s、10cm/s と 20cm/s の 3 通りに設定し、全 18 ケースの実験を行った。

### 3. 結果と考察

図-2はPIV実験で得られた界面流速の時空間分布の一例である。流速発散の瞬間値の絶対値が特に大きい部分（赤および青丸）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見られた。

図-3は発散のRMS値  $\beta'$  と  $\phi$  の関係を  $U_m$  ごとに整理したものである。断面平均流速が増加するほど  $\beta'$  は大きくなり、また断面平均流速に依らず  $\phi = 8.0 \sim 12.0$  付近で  $\beta'$  が最大値をもつことがわかる。これは複数の先行研究の報告と一致する。

図-4は表面流速  $U_s$  を変化させた時のガス輸送速度  $k_L$  と相対粗度間隔  $\phi$  の関係を示す。ガス輸送速度  $k_L$  は  $\phi = 12.0$  で最大値をとり、この傾向は流速発散強度  $\beta'$  や乱れエネルギー  $k_s$  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。特に今回のケースでは  $\phi = 12.0$  の粗度条件が最もガス輸送が活発になるような乱流構造をもつ。

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(1)はMcCreadyら<sup>1)</sup>のSD modelを示す。

$$k_L = \alpha \sqrt{D\beta'} \quad (1)$$

SD modelを実用化する場合、比例定数  $\alpha$  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<sup>2)</sup>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(2)を提案した。

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

図-5は式(2)を検証したもので、比較のため山上ら<sup>2)</sup>の滑面および植生流れ場における実験結果も示す。棧粗度流れ場での実験結果においても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  $\alpha$  は0.151と算出され、植生流れの実験結果<sup>2)</sup>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

本研究では棧粗度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

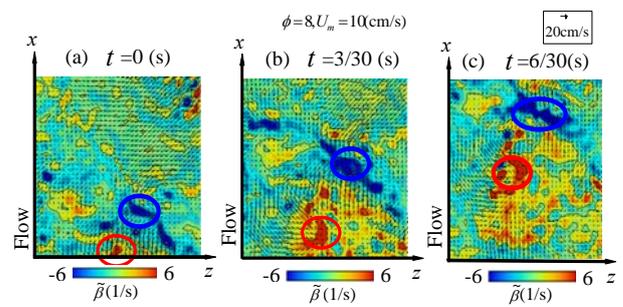


図-2  $\phi = 8, U_m = 10(\text{cm/s})$ における界面流速発散の時空間分布

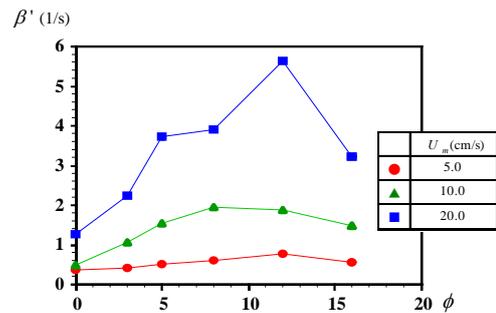


図-3 相対粗度間隔と界面流速発散及び断面平均流速の関係

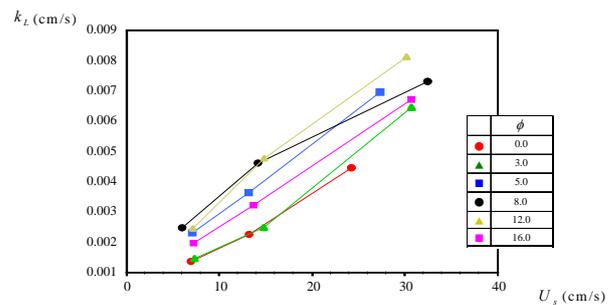


図-4 ガス輸送速度と時間平均表面流速の関係

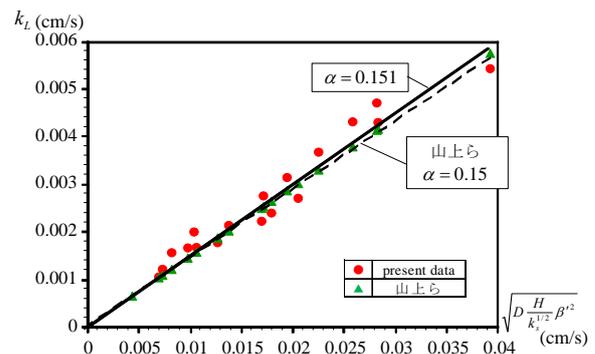


図-5 修正 SD model の本実験結果（棧粗度場）及び山上らの実験結果（滑面および水没植生<sup>2)</sup>への適用比較

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

### 参考文献

- McCready et al. "Computer simulation of turbulent mass transfer at a mobile interface", *AIChE Journal*, 32, 1108-1115, 1986.
- 山上・岡本・瀬津・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.