

気液界面における高シュミット数ガス交換の計算モデル

九州大学大学院総合理工学府 学生会員 ○中川大輔
九州大学大学院総合理工学研究院 正会員 杉原裕司

1. はじめに

気液界面におけるガス交換現象の直接数値シミュレーション (DNS) は比較的シュミット数が低い条件に限られており、高シュミット数の DNS を行うことは現在の計算環境を持ってしても実現困難である。本研究の目的は、DNS によって取得した界面流速データを溶存ガスの移流拡散方程式の入力値とし、気液界面極近傍のみを対象とした高シュミット数のガス交換解析を行う手法について検討することである。

2. ガス交換の計算モデル

本研究では、開水路乱流場を対象とする。基礎方程式は、水深 H 、底面の摩擦速度 u_τ 、水表面の溶存ガス濃度 C_s 、バルク領域濃度 C_b を用いて無次元化されている。図-1 に示すように界面を原点として鉛直下向きに z_* 軸をとる。解析対象となる高シュミット数の溶存ガスの濃度境界層は表面更新渦のスケールに比べて十分に薄いと考えられる。したがって、濃度境界層近傍での水平流速の鉛直変化は無視できる。従って、連続の式から

$$\frac{\partial w_*}{\partial z_*} = - \left(\frac{\partial u_*}{\partial x_*} + \frac{\partial v_*}{\partial y_*} \right) = - \beta_* \quad (1)$$

となる。 $z_*=0$ で $w_*=0$ と仮定すると鉛直流速 w_* は次のように表わされる。

$$w_* = -\beta_*(x_*, y_*, t_*)z_* \quad (2)$$

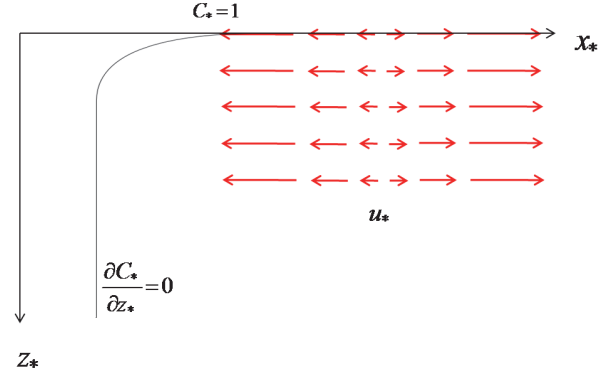
ここで、 β_* は水表面における水平流速の発散を示す。主流方向の水表面での平均流速で移動する座標系 x_* における移流拡散方程式は以下になる。

$$\frac{\partial c_*}{\partial t_*} + u_* \frac{\partial c_*}{\partial x_*} + v_* \frac{\partial c_*}{\partial y_*} - \beta_* z_* \frac{\partial c_*}{\partial z_*} = \frac{1}{Re_\tau Sc} \frac{\partial^2 c_*}{\partial z_*^2} \quad (3)$$

本研究の基礎方程式は式(3)であり、以降、簡単のために x_* を x と記述する。

本研究ではガス交換機構における水平移流の効果を検討するため、式(3)に基づく計算(Run1)とともに、式(3)の水平移流項を除いた計算 (Run2)の 2 つのパターンの数値計算を実行した。水平流速の入力値には、開水路乱流場の直接数値シミュレーションで得られた結果を用いている。

本計算では溶存ガスとして二酸化炭素を想定しており、 u_τ で定義されたレイノルズ数を $Re_\tau(u_\tau H/\nu) = 150$ に、



シュミット数を $Sc = 600$ に設定している。濃度境界条件として気液界面での無次元ガス濃度 $C_*=1$ 、界面から十分に離れた位置での鉛直濃度勾配を 0 と与えている。また、初期条件として、無次元溶存ガス濃度 C_* を界面で 1、その他の計算領域で 0 とした。鉛直方向の計算領域は水表面から開水路乱流場の 2.2% 水深までを対象とした。

3. 結果および考察

図-2 および図-3 は、それぞれ水平面内で空間平均化された溶存ガスの平均濃度と濃度変動の rms 値の鉛直分布の時間変化を示している。平均濃度は深さとともに鉛直方に指数関数的に減少しているが、rms 値は界面の近傍で極大値をとることがわかる。時間変化に着目した場合、平均濃度は時間の経過とともに増加し、それに伴い濃度境界層厚さも大きくなる。一方、rms 値は計算領域全体に渡って増大しており、極大値をとる深さも時間と共に増大していることがわかる。また、Run1 と Run2 の結果を比較した場合、Run1 は濃度の時間発展が遅く、鉛直方向の拡散も相対的に小さいことがわかる。これは Run1 では、溶存ガスの水平移流が界面での鉛直拡散を抑制しているためであると考えられる。

図-4 は水平面内で平均化された溶存ガス濃度の鉛直分布と rms を再規格化してプロットしたものである。Run1 の結果を赤線で、Run2 の結果を青線で示している。鉛直座標は z_*/δ_* のように規格化されている。平均濃度に関しては、界面濃度 c_{s*} とバルク濃度 c_{b*} の濃度差に基づく規格化を行っており、rms 値に関しては各々の rms 値の最大値を用いて規格化を行っている。これらの図より、開水路乱流場における高シュミット数の溶存ガスの平均濃度と濃度変動の rms 値の鉛直分布が、濃度境界層厚さを用いて普遍表示できることが確認できた。

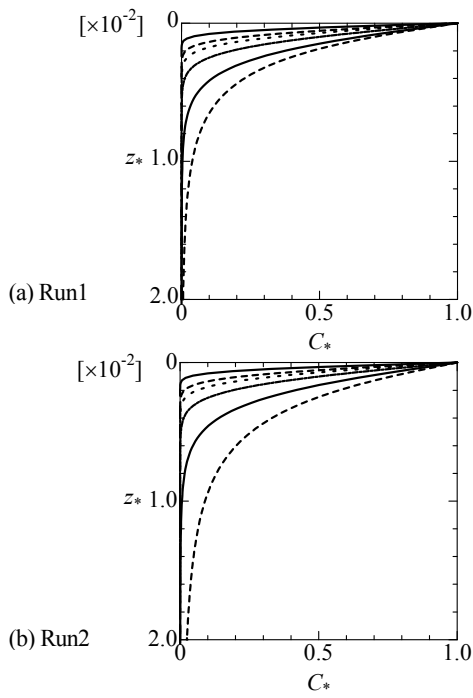


図-2 平均濃度の鉛直分布

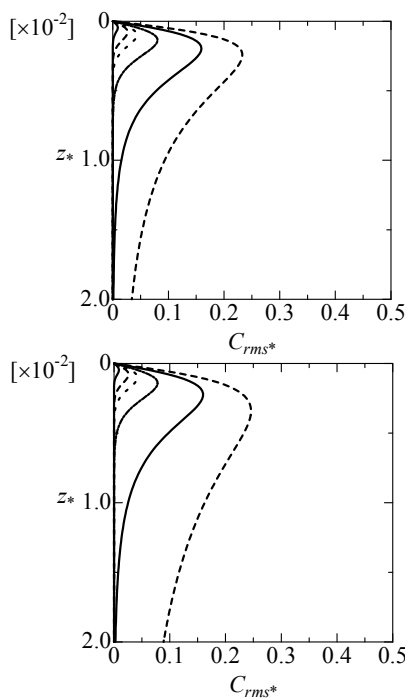


図-3 濃度変動の rms の鉛直分布

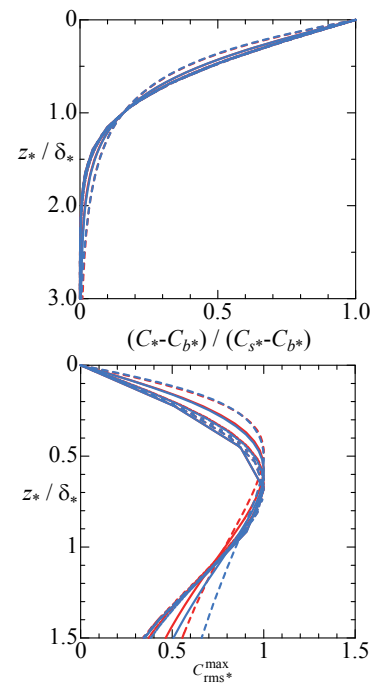


図-4 平均濃度と rms 分布の規格化

以降は、Run1 の結果のみを示す。図-5 は濃度境界層厚さ（赤）と平均ガスフラックス（青）の時間変化を示したものである。濃度境界層厚さは時間が経過するにつれて一定値に漸近するように見える。一方、ガスフラックスは計算初期において大きな値をとるが、時間の経過とともに一定値をとることがわかる。

図-5 では $t_* = 0.50$ 付近からフラックスが一定となっているため、ガス交換速度の算出には $t_* = 0.50$ 以降のデータを使用する。図-6 はガス交換速度と界面発散の関係を示したものである。ガス交換速度は Sc と界面の乱れエネルギー k_s を用いて無次元化している。また、本研究の結果とともに、山上・棚津¹⁾の開水路乱流場の実験データ¹⁾と、Tsumori and Sugihara²⁾の振動格子乱流場のデータも併せてプロットされている。本計算の結果は開水路乱流場の実験値に比較的近い値を取っており、このことは本研究の妥当性を示しているものと思われる。

4. まとめ

本研究では、速度場の入力値として開水路乱流場の DNS の結果を用いて高シュミット数のガス交換現象を再現する計算モデルを提案した。溶存ガスの移流拡散方程式における水平移流拡散項の効果を検討した結果、水平移流項は鉛直拡散を抑制しており、ガス交換に大きな影響を与えていることが明かとなった。さらに、濃度境界層厚さを用いて、溶存ガスの平均濃度および濃度変動の rms 値の鉛直分布を普遍的に規格化することができることを示した。

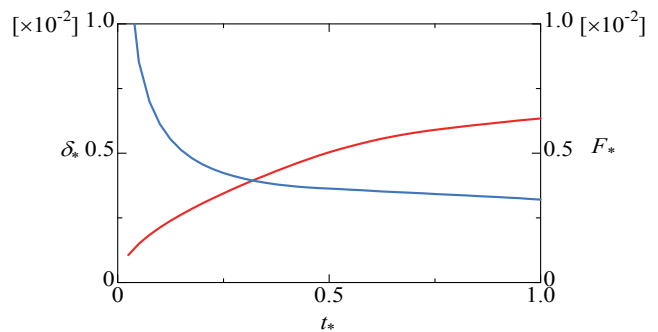


図-5 濃度境界層厚さとガスフラックスの時間変化

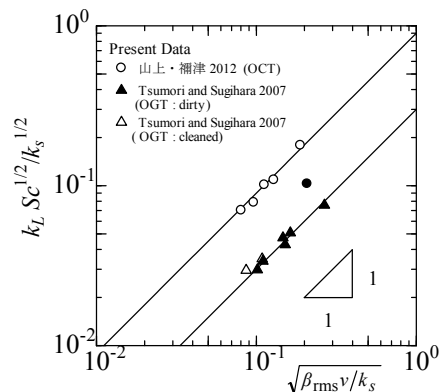


図-6 ガス交換速度と界面発散の関係

参考文献

- 1) 山上路生, 棚津家久: 開水路乱流における自由水面の流速発散とガス交換速度に関する実験的研究, 土木学会論文集B1, Vol.66, No.4, pp.1297-1302, 2012.
- 2) Tsumori, H. and Sugihara, Y.: Length scales of motions that control air/water gas transfer in grid stirred turbulence, *Journal Marine Systems*, Vol.66, pp.6-18, 2007.