

VII-82

振動格子乱流場における微小酸素電極を用いたガス交換機構に関する実験的研究

九州大学工学部 学生会員○村井 大亨 井上 徹教 油島 栄蔵
九州大学工学部 正会員 中村 由行 小松 利光

1. 目的 水表面を通しての物質輸送量を定量的に評価することは、曝気装置の設計等工学的な問題に対して、また地球温暖化に関して大気海洋間の炭酸ガス交換率を正確に算定する上でも極めて重要である。しかしながら、物質交換メカニズムに関しては未だ不明点が多く、輸送量を正確に予測・評価するまでには至っていない。その原因の一つは、濃度が急激に変化する領域がただか水表面下1 mm 程度のところであり、従来この領域の濃度を測定することは困難であったからである。そこで本実験では乱れをコントロールしやすく、かつ乱れの情報が得やすい振動格子乱流場を対象として、水槽内の乱れ特性、及び微小酸素電極を用いた水表面付近の DO 濃度分布の詳細な測定を行った。

2. 内容 2-1. 実験装置及び乱れの計測法 本実験で用いた装置の概要を図1及び図2に示す。水槽は長さ200.0 cm、高さ50.0 cm、幅25.0 cmの亚克力製で、角柱正方格子（メッシュサイズ $M=4.418$ cm, 棧幅 $d=0.884$ cm, $M/d=5.0$ ）を水槽底部から20.0 cm 上方に取り付け、これを鉛直に振動させることにより乱れを発生させた。乱れの強さは格子の振動数 f (Hz) によりコントロールし、乱流レイノルズ数 R_L は $R_L = 2 u_s' L_{90}' / \nu$ により算出した。ここで u_s' , L_{90}' は水表面における代表速度スケールおよび代表長さスケールで、当研究室の実験水槽の特性量としてそれぞれ $u_s' = 0.27 f S^{1/5} M^{0.5} Z_s^{-1}$, $L_{90}' = 0.132 Z_s - 0.359$ により算出した。 ν は水の動粘性係数、 S は格子のストローク、 Z_s は格子の振動の中心 ($Z=0.0$ cm) から水表面までの距離である。本研究では全実験を通じて $Z_s = 20.0$ cm とした。また水槽内の水は水道水を用いた。表1に各実験条件を示す。乱れ (u' , w') の計測には FLV (Fiber Laser Velocimeter) を使用し、それを水槽と独立させたトラバース装置に取り付け、水平方向に走行させながら乱れの計測を行なった。

2-2. DO 濃度境界層と濃度測定法 一般に、酸素のような溶解度の低い物質の水表面におけるガス交換は、液相側の乱流条件と水表面近傍特性によって支配されることが知られている。このことから液相を水表面近傍領域 (Surface Influenced Layer) と、それ以外の領域 (bulk 領域) の二つに分けて考える必要がある。DO 濃度分布に関しては SIL はさらに、濃度が一様な領域と水表面極近傍の濃度境界層とに分けられる。

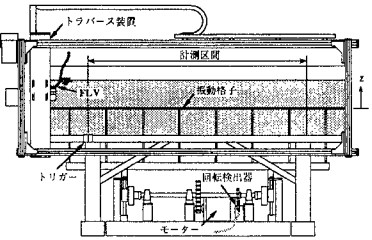


図1. 振動格子実験装置

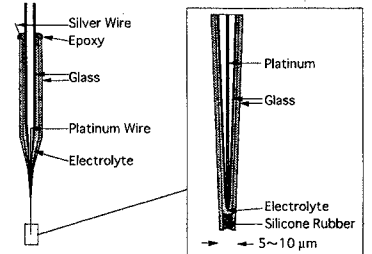


図2. 微小酸素電極

表1. 実験条件

測定番号	f (Hz)	S (mm)	Z_s (mm)	L_{90}' (mm)	u_s' (mm/s)	R_L	S_c	水温(°C)
No.1	6.0	60	200	26.0	25.0	1075	713	11.3 ~ 14.4
No.2	3.0	60	200	26.0	12.5	518	767	11.1 ~ 12.1
No.3	2.0	60	200	26.0	8.3	341	785	11.1 ~ 11.3
No.4	4.0	60	200	26.0	16.7	729	689	13.0 ~ 14.0
No.5	1.2	60	200	26.0	5.0	231	618	15.1 ~ 15.9

微小酸素電極 (図2) を用いた DO 濃度分布の測定では、振動格子水槽とは別の系に取り付けた電動シリンダ (オリエンタル・モーター CPMS151B-05D) に電極を取り付けることによって鉛直

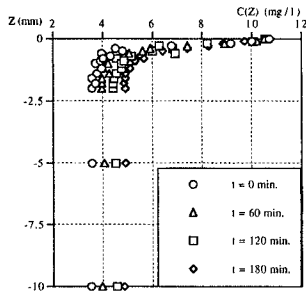


図3. DO 濃度鉛直分布の時間変化 ($R_L = 729$)

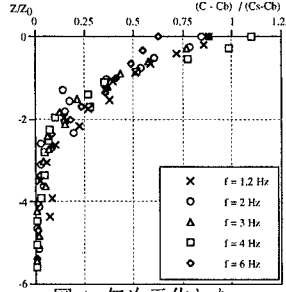


図4. 無次元化した DO 濃度の鉛直分布

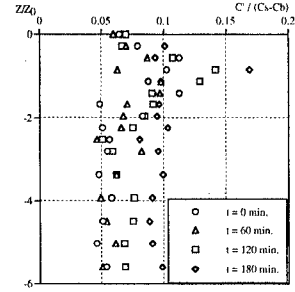


図5. 無次元化した DO 濃度の乱れ成分の鉛直分布 ($R_L = 729$)

キーワード：微小酸素電極、振動格子乱流、ガス交換、溶存酸素、濃度境界層
連絡先：福岡市東区箱崎 6-10-1 TEL 092-642-3281

方向にトラバースさせ、水面下 30 mm まで、最小測定間隔 $\Delta z = 100 \mu\text{m}$ で測定を行った。この測定を各振動条件に対して 60 ～ 100 分毎に行った。実験前には窒素バブリングを行い、水槽内の DO 濃度を約 2 mg/l にした。

2-3. 実験結果及び考察 図 3 は振動条件が $R_L = 729$ のときの DO 濃度の鉛直分布の時間変化を示したものである。この図から時間の経過とともに鉛直分布の勾配が減少していく様子が確認できる。図 4, 5 は、それぞれ、無次元化した DO 濃度の平均及び乱れ成分の鉛直分布である。なお水深 Z は水面を原点として鉛直上向きを正にとった座標で、次式を満たす定数 Z_0 で無次元化している。

$$(\bar{C} - C_b) / (C_s - C_b) = \exp(Z / Z_0) \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 C_s は DO 飽和濃度、 C_b は bulk における DO 濃度である。図 4 によると、水深を Z_0 で無次元化することにより、振動条件が異なる場合にも鉛直分布がほぼ同一曲線上に並ぶことがわかる。また図 5 より乱れ成分の最大値は水面より幾分下方 ($Z \sim -Z_0$) に存在することがわかる。

図 6 から、気体輸送係数 K_L が求められる。 K_L は水面を通過するフラックスに関する次の微分方程式を解くことによって求まる。

$$dC_b / dt = (K_L / h) (C_s - C_b) \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 h は水槽中の全水深である。式 (2) を解くと、

$$\ln(C_s - C_b) = -K_L / h \times t + \text{const.} \quad \text{----- (3)}$$

が得られる。したがって図 6 のグラフの傾きから K_L を算出できる。

図 7 は様々な濃度境界層厚さ (Z_0, δ, L_D) を乱流レイノルズ数 R_L に対してプロットしたものである。ここで、 δ は Lewis - Whitman が定義した境界層厚さであり、また L_D は拡散境界層厚である。両者はそれぞれ $\delta = K_L / D, L_D = 2 L_\infty R_L^{-0.5} Sc^{0.5}$ で表される。 D は分子拡散係数で、 Sc は Schmidt 数と呼ばれ $Sc = \nu / D$ である。これによると各層厚はレイノルズ数の増加に伴い減少傾向にあることがわかる。また図中には Chu and Jirka のデータをプロットしているが、彼らのデータと比較すると、 Z_0 を除いて本実験データと傾向がよく一致していることがわかる。

図 8 は上記の濃度境界層厚さを、水面の代表長さスケールである L_∞' を用いて無次元化したものを、 $R_L^{-0.5} \times Sc^{0.5}$ に対してプロットしたものである。この図によると各濃度境界層厚さは $R_L^{-0.5} \times Sc^{0.5}$ に比例することがわかる。また、 Z_0 を除いて Chu and Jirka のデータと傾向がよく一致していることがわかる。

図 9 は無次元ガス交換速度 K_L / u_s' を乱流レイノルズ数 R_L に対してプロットしたものである。この図によると K_L / u_s' は乱流レイノルズ数に依存し、 R_L がもっとも大きい点を除いて、ほぼ $R_L^{-0.5}$ に比例することがわかる。ただし Chu and Jirka の実験値より小さめである。これは Sc の違いによるものと考えられる。そこで、無次元ガス交換速度 K_L / u_s' を $R_L^{-0.5} \times Sc^{-0.5}$ に対してプロットしたものが図 10 である。large eddy がガス交換機構に対して支配的であるという仮定から半経験的に次式が導かれている。

$$K_L / u_s' = \beta R_L^{-0.5} \times Sc^{-0.5} \quad \text{----- (4)}$$

図 10 から、本実験データは上式によく一致することが確認できる。このことから、本実験範囲内ではガス交換は large eddy により支配されていると考えられる。

3. 結論 本実験で得られた知見を列挙すると以下の通りである。

- (1) 本実験では微小酸素電極を用いて水面近傍領域の詳細な DO 濃度分布測定を行った。
- (2) 濃度境界層厚さは、 $R_L^{-0.5} \times Sc^{-0.5}$ に比例する。
- (3) 本実験範囲内では無次元ガス交換速度も $R_L^{-0.5} \times Sc^{-0.5}$ に比例し、従って large eddy がガス交換に対して支配的であると考えられる。

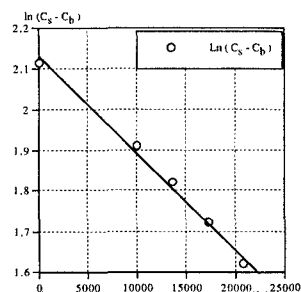


図 6. bulk の DO 濃度の時間変化

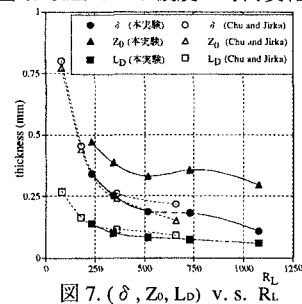


図 7. (δ, Z_0, L_D) v.s. R_L

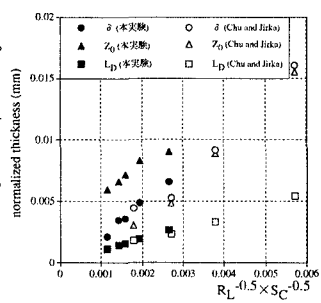


図 8. (δ, Z_0, L_D) v.s. $R_L^{-0.5} \times Sc^{0.5}$

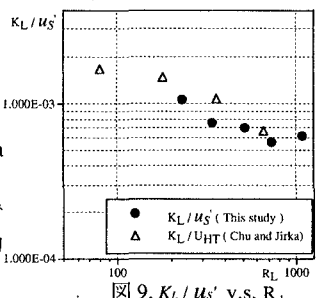


図 9. K_L / u_s' v.s. R_L

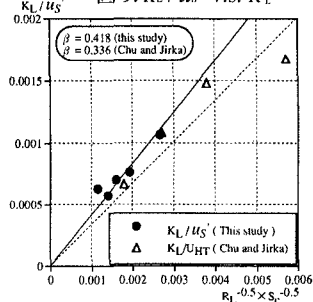


図 10. K_L / u_s' v.s. $R_L^{-0.5} \times Sc^{-0.5}$