

風波気液界面における CO<sub>2</sub> 交換速度の評価

九州大学 工学部 学生会員 宮崎 大輔 総理工 学生会員 津守 博通  
 総理工 正会員 杉原 裕司 総理工 学生会員 古寺 大悟

1. 緒論

大気海洋間の CO<sub>2</sub> 交換速度を精度良く評価することは、地球環境の将来予測を行う上で重要な課題である。これまで提案されてきた交換速度の評価式の多くは、主に海上風速や気流の摩擦速度との相関式であり、それらのほとんどが無次元表示されていない。このような評価式は、多様な波浪条件下の気体交換速度を推定する上で問題がある。また、これまでに行われた実験研究の多くは、風洞水槽全体の平均的な交換速度に関するものであり、このような場合交換速度をどの吹送距離における風波特性状と関係づけるべきであるかという問題が生じる。本研究の目的は、風波気液界面において吹送距離ごとに局所的な CO<sub>2</sub> フラックスを測定し、吹送距離依存性を考慮した気体交換速度の評価法を実験的に検討することである。

2. 気体交換速度の算定方法

本研究では CO<sub>2</sub> フラックスの測定にプロファイル法を用いた。界面の極近傍を除き、CO<sub>2</sub> の鉛直フラックス  $F$  (mol/m<sup>2</sup>·s) は乱流輸送によるものと考えられ、次式で表すことができる。

$$F = -K_f \frac{\partial C_a}{\partial z} = -\kappa u_w z \frac{\partial C_a}{\partial z} \quad (1)$$

ここで、 $K_f$  (m<sup>2</sup>/s) は CO<sub>2</sub> に関する渦拡散係数、 $C_a$  (mol/m<sup>3</sup>) は気流側の平均 CO<sub>2</sub> 濃度、 $u_w$  (m/s) は気流側の摩擦速度、 $\kappa$  はカルマン定数 (= 0.4) である。また、ここで  $F$  は鉛直方向に変化しないことに注意する。式(1)の両辺を  $z$  で積分し、風速の対数分布則から得られた粗度高さ  $z_0$  における CO<sub>2</sub> 濃度を  $C_a(z_0)$  とすると、次式が得られる。

$$\frac{C_a(z_0) - C_a(z)}{C_s} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (2)$$

ここで、 $C_s$  は  $F = C_s u_w$  と定義されている。

以上のように、ある吹送距離で得られた平均 CO<sub>2</sub> 濃度の

鉛直分布に式(2)を適合させて  $C_s$  を算定し、同じ吹送距離における摩擦速度  $u_w$  を求め、 $F = C_s u_w$  から CO<sub>2</sub> フラックスを算定することができる。気体交換速度  $k_L$  は CO<sub>2</sub> フラックス  $F$  から次式により算定される。

$$F = C_s u_w = k_L (C_w - C_s) \quad (3)$$

ここで、 $C_w$  (mol/m<sup>3</sup>) は水中の溶存 CO<sub>2</sub> 濃度であり、 $C_s$  (mol/m<sup>3</sup>) は水表面における気流側の CO<sub>2</sub> 濃度と平衡状態の水側の CO<sub>2</sub> 濃度である。

3. 実験装置および実験方法

図-1 に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。実験には、長さ 17 m、高さ 0.8 m、幅 0.6 m の矩形断面を有する風洞水槽 (九州大学応用力学研究所所有) を用いた。全てのケースにおいて水深は 0.39 m に固定された。実験は基準風速を  $U_r = 4.0 \sim 12.0$  m/s の 9 通りに、吹送距離  $x$  を 2.0, 6.0, 9.0, 12.0 m の 4 通りに変化させた合計 36 ケースについて行った。水側から気流側へ輸送される CO<sub>2</sub> フラックスを測定するために、予め水槽内の水を CO<sub>2</sub> で曝気し、水中の溶存 CO<sub>2</sub> 濃度を高くした。曝気は水槽内の水をポンプで循環させながら途中の管路に 100 %濃度の CO<sub>2</sub> ガスを注入することにより行った。風洞内の空気はエアーポンプを用いてサンプリングチューブにより採取し、NDIR を用いて CO<sub>2</sub> 分率 (ppm) を測定した。風速の測定にはピトー管を、水中の溶存 CO<sub>2</sub> 濃度の測定には気液平衡器を用いた。

4. 実験結果および考察

図-2 に、基準風速  $U_r = 6.0$  m/s におけるそれぞれの吹送距離での気流側平均 CO<sub>2</sub> 濃度の鉛直分布を示す。この図から水表面近傍において対数分布に従う領域が形成されていることがわかる。この領域に式(2)を適合させることにより、 $C_s$  が算定されている。

図-3 に、それぞれの吹送距離における  $k_L$  と  $u_w$  の関係を示す。全ての吹送距離において、 $k_L$  は  $u_w$  とともに増加していることがわかる。また、同じ  $u_w$  に対しては、吹送距離が

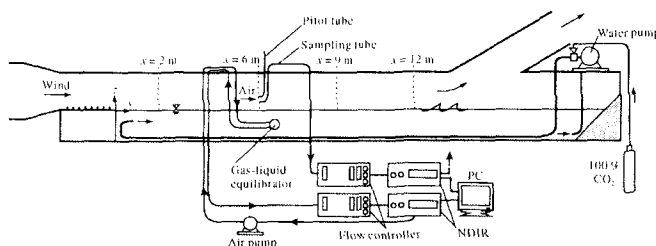


図-1 実験装置の概略図

大きくなるにつれて  $k_L$  も増加していることがわかる。

ここで、 $k_L$  の次元解析を行う。気体交換速度  $k_L$  は吹送距離依存性を考慮すると次のような物理量に依存すると考えられる。

$$k_L = f(D, \nu_w, u_{*w}, x, g) \quad (4)$$

ここで、 $D$  は水中の  $\text{CO}_2$  分子拡散係数、 $\nu_w$  は水の動粘性係数、 $u_{*w}$  は水側の摩擦速度、 $g$  は重力加速度である。次元解析から  $k_L$  は次のような無次元パラメータに支配されることがわかる。

$$\frac{k_L}{u_{*w}} = f\left(\frac{\nu_w}{D}, \frac{gx}{u_{*w}^2}, \frac{u_{*w}^3}{g\nu_w}\right) \quad (5)$$

$k_L$  はシュミット数  $Sc (= \nu_w/D)$  の  $1/2$  乗に比例することが広く認められており、その関係を考慮すると  $k_L$  の無次元式として次式が得られる。

$$\frac{k_L Sc^{1/2}}{u_{*w}} = f\left(\frac{gx}{u_{*w}^2}, \frac{u_{*w}^3}{g\nu_w}\right) \quad (6)$$

したがって、実験値に基づいて関数  $f$  を確定すれば、気体交換速度  $k_L$  が普遍表示できることになる。

実験値から  $gx/u_{*w}^2$  の値がほぼ等しいデータの組をつくり、それらに対して  $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  と  $u_{*w}^3/g\nu_w$  の関係を調べる。図-4 に、 $gx/u_{*w}^2$  を固定した場合の  $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  と  $u_{*w}^3/g\nu_w$  の関係を示す。この図より、 $gx/u_{*w}^2$  の値が一定のとき、 $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  は  $(u_{*w}^3/g\nu_w)^{1/3}$  に比例することがわかる。

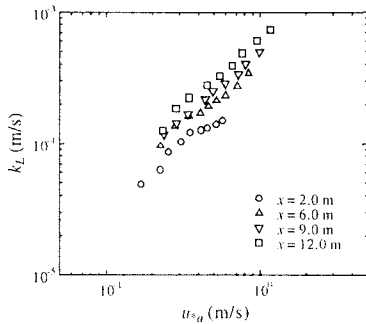


図-3  $k_L$  と  $u_{*w}$  の関係

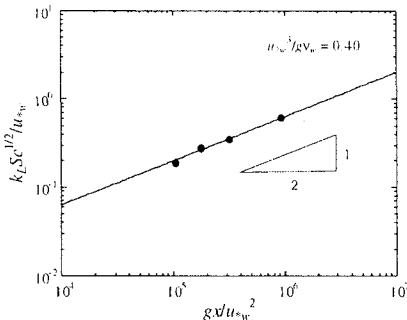


図-5  $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  と  $gx/u_{*w}^2$  の関係

次に、 $u_{*w}^3/g\nu_w$  の値が一定の場合における  $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  と  $gx/u_{*w}^2$  の関係を調べる。図-5 に、 $u_{*w}^3/g\nu_w$  の値を 0.40 に固定した場合の  $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  と  $gx/u_{*w}^2$  の関係を示す。この図より  $u_{*w}^3/g\nu_w$  の値が一定の場合、 $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  は  $(gx/u_{*w}^2)^{1/2}$  に比例することがわかる。

図-4, 5 から  $gx/u_{*w}^2$  と  $u_{*w}^3/g\nu_w$  に対する具体的な関数形が決定され、無次元  $k_L$  は次式のように示されることがわかる。

$$\frac{k_L Sc^{1/2}}{u_{*w}} = A \left(\frac{gx}{u_{*w}^2}\right)^{1/2} \left(\frac{u_{*w}^3}{g\nu_w}\right)^{1/3} \quad (7)$$

図-6 に  $k_L Sc^{1/2}/[u_{*w}(gx/u_{*w}^2)^{1/2}]$  と  $u_{*w}^3/g\nu_w$  の関係を示す。この図では、実験値の吹送距離依存性は消え、一つの曲線に普遍表示されていることがわかる。この図から、式(7)中の比例定数  $A$  は  $8.58 \times 10^{-4}$  となることがわかった。今後、従来の評価式や観測値との比較を行い、式(7)の現地適用性について詳しく検討していく予定である。

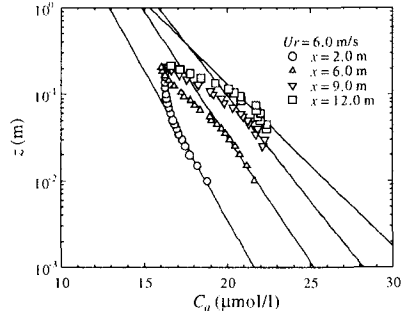


図-2 平均  $\text{CO}_2$  濃度の鉛直分布

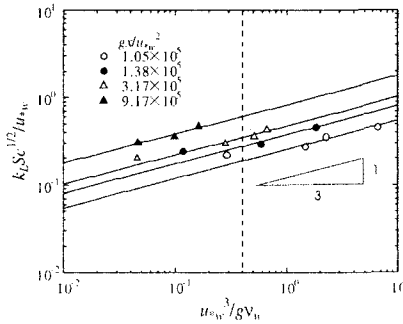


図-4  $gx/u_{*w}^2$  を固定した  $k_L Sc^{1/2}/u_{*w}$  と  $u_{*w}^3/g\nu_w$  の関係

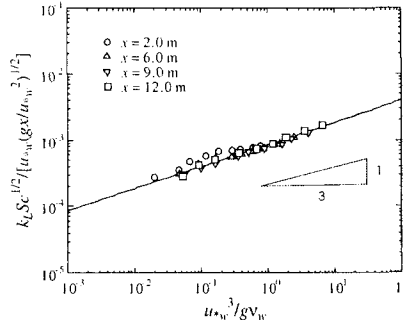


図-6  $k_L$  の普遍表示