

風波気液界面における二酸化炭素交換量の測定

九州大学 大学院総理工 学生員 ○津守 博通 正会員 杉原 裕司  
 学生員 古寺 大悟 正会員 松永 信博  
 応用力学研究所 非会員 増田 章

1. はじめに

大気海洋間におけるガス交換を定量化するために、これまで多くの室内実験や現地観測が行われてきた。例えば、Komori et al<sup>1)</sup>は、風洞水槽を用いて風波気液界面におけるCO<sub>2</sub>の交換係数k<sub>L</sub>を評価した。彼らは、水槽内の水をCO<sub>2</sub>で曝気し、水側から気流側へ輸送されるCO<sub>2</sub>フラックスからk<sub>L</sub>を算定している。ただし、この研究では水中の溶存CO<sub>2</sub>濃度の測定に全炭素計を使用しており、炭酸水素イオン等まで含めた全炭酸の値を溶存CO<sub>2</sub>濃度としている。しかしながら、実際のCO<sub>2</sub>フラックスは大気中のCO<sub>2</sub>分圧と水中に気体として存在する溶存CO<sub>2</sub>分圧の差によって生じている。したがって、k<sub>L</sub>を正確に算定するためには、気体のみによる溶存CO<sub>2</sub>分圧を測定する必要がある。このような背景から、本研究では気液平衡器を用いて水中の溶存CO<sub>2</sub>分圧を測定し、風波気液界面におけるCO<sub>2</sub>交換係数を評価する風洞水槽実験を行った。ここでは、実験の概要と予備的な結果について報告する。

2. 実験装置および実験方法

図-1に実験装置の概略図を示す。実験には、長さ17m、高さ0.8m、幅0.6m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。水槽内の水深は全てのケースで39cmに固定された。水側から気流側への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>分圧を高くした。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。水中の溶存CO<sub>2</sub>分圧の測定には、気体のみを通過させる疎水性多孔質膜による気液平衡器を用いた。気液平衡器は、バルク領域の分圧を測定するために、半水深の位置に設置された。図-1に示すように、気液平衡器を経由する閉管路をつくり、エアーポンプで空気を循環させた。閉管路内のCO<sub>2</sub>と水中のCO<sub>2</sub>は多孔質膜を通して交換され、閉管路内のCO<sub>2</sub>分圧は溶存CO<sub>2</sub>分圧と平衡状態になる。本研究では、閉管路内の空気のCO<sub>2</sub>濃度を赤外線ガス分析計を用いて測定し、その値から溶存CO<sub>2</sub>分圧を算定した。

溶存CO<sub>2</sub>分圧が約10,000 μatmに達した後に曝気を終了し、送風により風波を発生させて水側から気流側へ輸送されるCO<sub>2</sub>フラックスを測定した。本実験においては、基準風速U<sub>r</sub>を7.5, 10.0 m/sと変えた2ケースの実験を行った。吹送距離x=9.75~11.75 mの領域にコントロールボリュームを設定し、そのコントロールボリュームの両端において気流のCO<sub>2</sub>分圧の鉛直分布を測定した。気流側の分圧測定には赤外線ガス分析計を用いた。CO<sub>2</sub>分圧と風速の鉛直分布から、次式によりCO<sub>2</sub>フラックスFが算定できる。

$$L \cdot F = \int U \cdot C_g dz \Big|_{x=11.75m} - \int U \cdot C_g dz \Big|_{x=9.75m} \quad (1)$$

ここで、Uは風速、C<sub>g</sub>は気流側のCO<sub>2</sub>分圧、Lはコントロールボリュームの水平方向長さである。また、コントロールボリューム内では風速分布が変化しないと仮定し、

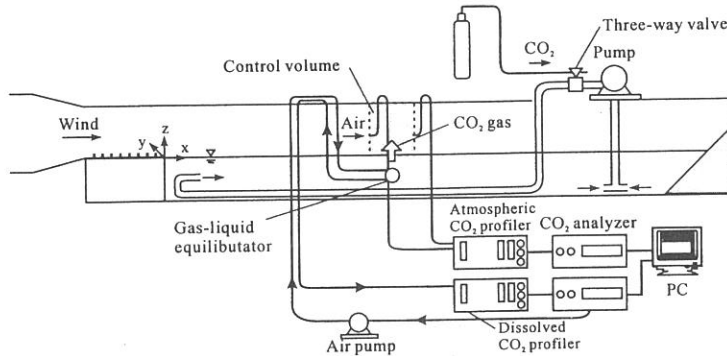


図-1 実験装置の概略図

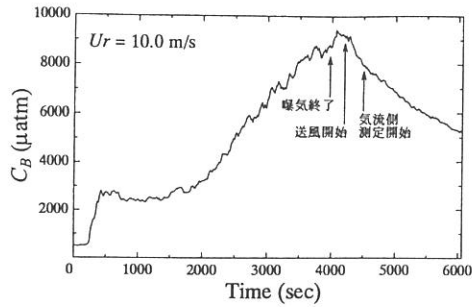


図-2 溶存 CO<sub>2</sub> 分圧の時間変化

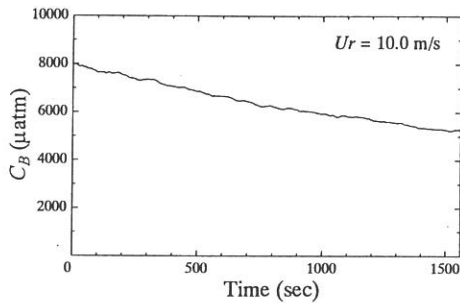


図-4 気流側測定時における溶存 CO<sub>2</sub> 分圧の時間変化

吹送距離  $x = 10.75$  m における風速の値を用いて解析を行った。  $k_L$  の算定には次式を用いた。

$$F = k_L (C_B - C_S) \quad (2)$$

ここで、  $C_B$  は溶存 CO<sub>2</sub> 分圧、  $C_S$  は水表面での平衡分圧である。

### 3. 実験結果および考察

図-2 に、  $U_r = 10.0$  m/s における曝気開始から測定終了までの溶存 CO<sub>2</sub> 分圧  $C_B$  の時間変化を示す。曝気開始から  $C_B$  が上昇するまでに 500 秒程度の時間差があるが、これは水槽の端から噴射される高 CO<sub>2</sub> 濃度の水塊が気液平衡器の位置に到達するまでに時間を要するためである。この水塊が気液平衡器に到達すると  $C_B$  は徐々に増加していき、曝気が終了した後の送風開始とともに減少していくことがわかる。

図-3 に、  $U_r = 10.0$  m/s における吹送距離  $x = 9.75, 11.75$  m での気流側の CO<sub>2</sub> 分圧  $C_G$  の鉛直分布を示す。両者ともに水表面に近づくにつれて大きくなっていることがわかる。また、風洞上部ではフラックスがゼロになるため  $C_G$  が一様分布となり、水表面近傍ではコントロールボリューム両端の  $C_B$  の差は小さくなる傾向がある。

図-4 に、  $U_r = 10.0$  m/s における CO<sub>2</sub> フラックス測定中の溶存 CO<sub>2</sub> 分圧  $C_B$  の時間変化を示す。この図から、水側から気流側へと CO<sub>2</sub> が輸送されるため、溶存 CO<sub>2</sub> 分圧は CO<sub>2</sub> フラックス測定中の間に減少していることが

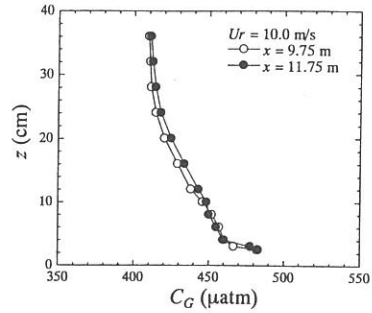


図-3 気流側 CO<sub>2</sub> 分圧の鉛直分布

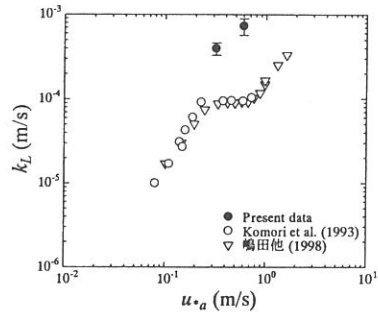


図-5  $k_L$  と  $u_{*o}$  の関係

わかる。式 (2) から  $k_L$  を算定するにあたっては、  $C_B$  の値としてフラックス測定中の平均値を用いた。また、  $C_S$  の値は  $C_B$  に比べて十分小さいことから、  $k_L$  の算定では特に考慮されていない。

図-5 は、  $C_B$  の平均値に対する  $k_L$  を風の摩擦速度  $u_{*o}$  に対してプロットしたものである。ここで、エラーバーの上限はフラックス測定中における  $C_B$  の最小値に対する  $k_L$  の値を、下限は最大値に対する  $k_L$  の値を表している。また比較のために、 Komori et al.<sup>1)</sup> や CO<sub>2</sub> をトレーサとして実験を行った嶋田他<sup>2)</sup> のデータもプロットしている。同じ摩擦速度で比較した場合、本実験の  $k_L$  が相対的に大きくなっていることがわかる。この理由として、他の研究では全炭酸値を用いて溶存 CO<sub>2</sub> 分圧を評価したため、  $k_L$  を過小評価していることが考えられる。この差異は比較的大きく、  $k_L$  のパラメタリゼーションを行う上で無視できないように思われる。  $u_{*o}$  に対する  $k_L$  の挙動の詳細については発表時に述べる予定である。

### 参考文献

- 1) Komori, S., R. Nagaosa and Y. Murakami (1993) : Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence, J. Fluid Mech., Vol. 249, pp. 161-183.
- 2) 嶋田隆司, 三角隆太, 小森悟 (1998) : 気液界面を通しての炭酸ガスの物質移動係数に及ぼす海水の効果, 日本機械学会論文集 (B 編), 64 巻, 621 号, pp. 1470-1477.