

風波砕波パラメータに基づく海面ガス交換係数の評価

九州大学総理工 学生会員 ○津守 博通 九州大学工学部 非会員 古寺 大悟
九州大学総理工 正会員 杉原 裕司 正会員 松永 信博

1. はじめに

大気海洋間の物質交換を定量的に評価することは、環境変動の予測手法を確立する上で重要である。しかしながら、提案されている k_L の評価式の多くは、海上風速もしくは気流の摩擦速度で表示されており実海洋における多様な波浪条件下のガス交換量を精度良く予測する上で問題がある。本研究の目的は、風洞水槽を用いた室内実験よってガス交換係数 k_L を算定し、風波特性を考慮した k_L のパラメタリゼーションを行うことである。

2. ガス交換係数の次元解析

k_L は速度の次元をもち、次のような物理量に依存するものと考えられる。

$$k_L = f(D, u_{*w}, \eta, \omega_p, S) \quad (1)$$

ここで、 D は溶存ガスの分子拡散係数、 u_{*w} は水側の摩擦速度、 η は水面変動の rms 値、 ω_p は風波のピーク角周波数、 S は表面更新率である。 S は界面近傍の乱流状態に強く依存しており、本研究では乱れの積分時間スケールの逆数で表現できるものと仮定する。次元解析により、ガス交換係数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。

$$\frac{k_L}{u_{*w}} = f\left(\frac{DS}{u_{*w}^2}, \frac{u_{*w}}{\eta\omega_p}, \frac{S}{\omega_p}\right) \quad (2)$$

ここで、風波界面のガス交換が表面更新理論 ($k_L \propto \sqrt{DS}$) に従うものと仮定すると式 (2) は次式ようになる。

$$\frac{k_L}{u_{*w}} = g\left(\frac{u_{*w}}{\eta\omega_p}, \frac{S}{\omega_p}\right) \sqrt{\frac{DS}{u_{*w}^2}} \quad (3)$$

したがって、実験値に基づいて関数 g を確定すれば、ガス交換係数 k_L が普遍表示できることになる。

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。実験水槽は、長さ 6.2 m、高さ 0.46 m、幅 0.15 m の矩形断面を有する風洞水槽で、送風により風波を発生させることができる。表-1 に実験条件を示す。ここで、 U_∞ は境界層外縁の風速、 u_{*a} は気流の摩擦速度である。水深 h は全てのケースにおいて 20 cm に固定されている。風速の測定にはベーン式風速計を使用し、波高および水中流速の測定にはそれぞれ容量式波高計とレーザードップラー流速計 (LDV) を用いた。

k_L はトレーサーガスによって変化するが、その値はシュミット数によって変換できるものと考えられる。溶存酸素 (DO) に対しては精度の良いセンサーが開発されているこ

とから、本研究ではトレーサーガスとして酸素を用いた。予め窒素ガスを曝気することにより、水槽内の DO 濃度を 2 mg/l 程度まで低下させて、復元する濃度の時間変化を DO センサーを用いて測定した。また、水槽内の水を採水することにより DO 滴定分析も併せて行った。測定された滴定値は DO センサーの検定に用いられた。

4. 実験結果および考察

図-2 に、 u_{*a} の変化に対する k_L の依存性を示す。図中には、比較のために Komori et al.¹⁾ および Nakayama²⁾ の実験値もプロットされている。 u_{*a} が比較的小さい時には、 k_L は u_{*a} とともに単調に増加するのに対し、 u_{*a} の大きい領域においてはその増加率が徐々に小さくなるのがわかる。

図-3 に、 $\eta\omega_p$ に対する u_{*w} の依存性を示す。この図より、 u_{*w} は $\eta\omega_p$ に近似的に比例しており、式 (3) における無次元パラメータ $u_{*w}/\eta\omega_p$ は一定値とみなせることがわかる。

図-3 の関係を考慮して、無次元 k_L を S/ω_p に対してプロットしたものが図-4 である。ここで、 Sc は ν_w/D で定義されるシュミット数であり、 ν_w は水の動粘性係数を示す。本研究では、実験値の関係を $y = a - b \exp(-cx^2)$ で近似する。この近似式が関数 g に相当し、実験値に最もよく適合するように係数を決めた曲線が図中に示されている。

ガス交換の Small-eddy model に基づいて、表面更新率 S が $\sqrt{\varepsilon/\nu_w}$ に比例するものとする。ここで、 ε は界面近傍における水中乱流のエネルギー散逸率である。 ε は乱流理論の類推から、 u_{*w}^2/η に比例するものと考えられる。その場合、図-3 の関係より、 S は $\sqrt{u_{*w}^2\omega_p/\nu_w}$ に比例することになる。これらの関係が図-5 に示されており、 $S = 0.015\sqrt{u_{*w}^2\omega_p/\nu_w}$ が成り立つことがわかる。

得られた関係式を用いて、式 (3) は次式ようになる。

$$\frac{k_L Sc^{1/2}}{u_{*a}} = A [a - b \exp(-\beta R_B)] (1 + BR_B)^{-1/4} \quad (4)$$

ここで、 u_{*w} および ν_w はそれぞれ気流側の値に変換されていることに注意する。 R_B は $u_{*a}^2/\omega_p\nu_a$ で定義されており、海水滴の生成や白波被覆率を定量化する上で重要な風波砕波パラメータである。また、 $-1/4$ 乗 () 内の 1 は、式 (4) が小さい R_B の領域まで近似的に適用できるように導入されたものであり、式中の A 、 B および β は近似的に定数とみなせる。図-6 は、式 (4) と実験値を比較したものである。この図より、式 (4) はガス交換係数の R_B 依存性を適切に表現することがわかる。また、無次元 k_L は $R_B = 10^3$ 付近でピークをもっており、この値は砕波状態と密接に関係しているものと思われる。今後、現地観測データ

との比較を通して、式(4)の有効性を検証する予定である。

2) Nakayama, T.: Turbulence and coherent structures across air-water interface and relationship with gas transfer, *Ph.D Thesis, Kyoto University, 2000.*

参考文献

1) Komori, S., Nagaosa, R. and Murakami, Y.: Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol.249, pp.161-183, 1993.

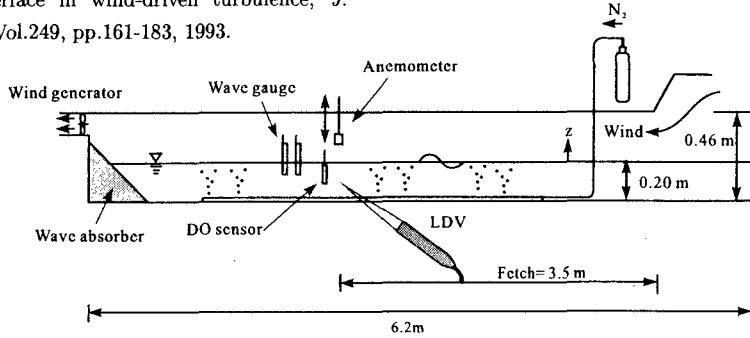


図-1 実験装置の概略図

表-1 実験条件

Run	U_∞ (m/s)	u_{*w} (m/s)	η (cm)	ω_p (s ⁻¹)	k_L (m/s)
1	6.71	0.253	0.279	25.40	6.53×10^{-5}
2	7.68	0.316	0.369	22.78	9.36×10^{-5}
3	8.35	0.368	0.484	20.43	9.74×10^{-5}
4	9.20	0.377	0.575	19.57	1.30×10^{-4}
5	10.36	0.492	0.629	18.33	1.26×10^{-4}
6	10.84	0.605	0.759	17.55	1.76×10^{-4}
7	12.03	0.658	0.915	16.44	1.89×10^{-4}
8	12.97	0.819	0.997	15.40	2.58×10^{-4}
9	14.09	1.106	1.098	14.74	2.35×10^{-4}

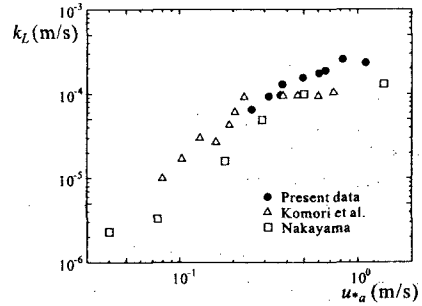


図-2 k_L の u_{*a} の依存性

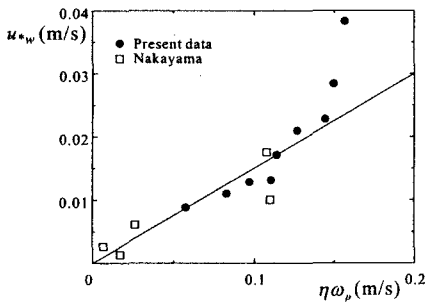


図-3 u_{*w} と $\eta \omega_p$ の関係

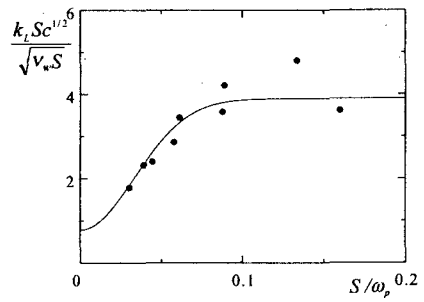


図-4 S / ω_p に対する k_L の関係

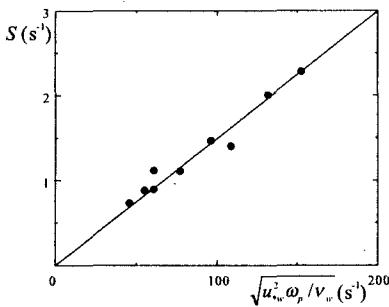


図-5 S と $\sqrt{u_{*w}^2 \omega_p / v_{*w}}$ の関係

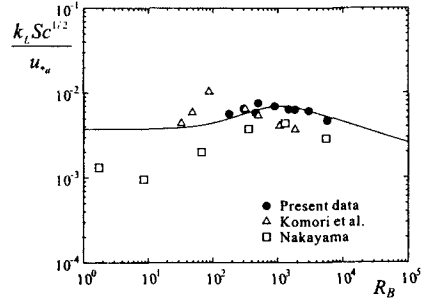


図-6 R_B に対する k_L の依存性