

II-187

水・空気2層流における気体輸送特性について

京都大学大学院 学生員 中山忠暢

京都大学大学院 正 員 瀬津家久

京都大学大学院 学生員 井上理恵

1. はじめに 水・空気界面を通しての気体輸送特性は水理学・環境工学的にも非常に重要な問題であり、本研究では気体輸送特性と界面近傍での乱流構造との関連性について研究を行った。その際に、底面シアアの卓越する開水路流れ、水面シアアの卓越する風波、及び両者が混在する流れを対象として、レーザ流速計と濃度計を用いた計測を行い、両者の関連性を検討した。

2. 実験方法および水理条件 本実験は全長16m、幅40cm、高さ50cmの風洞付き水路を用いて行った。瞬間流速の測定には4ビーム後方散乱型2成分レーザ流速計(Dantec社製)を用い、溶存酸素の濃度計測にはポーロ方式DOセンサーによる溶存酸素測定器(セントラル科学社製)を用いた。実験は底面シアアの卓越する開水路流れ、風によるシアアの卓越する流れ、両者の混在する開水路流れに分類され、表-1は両者の混在する開水路流れの水理条件である。Hは水深、 U_a は空気層での最大風速、 U_a^* は空気層での風速分布に対数則を適用して求めた摩擦速度、 U_{*b} は水層の底面での摩擦速度、フルード数は $F = U_a^* / (gH)^{0.5}$ 、 U_m は水層での断面平均流速、 η は水面変動強度である。

3. 理論的考察 O'Connor(1983)¹⁾は風波について滑面状態に境界膜モデル、粗面状態に表面更新モデルを適用し、界面での運動量の連続性を使って半理論的に気体輸送係数 K_L と空気側での摩擦速度 U_a^* の関係式を導いている。式(1)の右辺第1項が滑面、第2項が粗面における気体輸送係数である。以上より、 K_L は滑面状態では U_a^* の1乗、粗面状態では1/2乗、不完全粗面状態では最大2乗に比例することになる。

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{\left[\frac{D_m}{v_w} \right]^{2\beta} \left[\frac{\rho_a}{\rho_w} \right]^{1/2} \frac{\kappa^{1/3}}{\Gamma(U_a^*)} U_{*a}} + \frac{1}{\left[\frac{\rho_a v_a}{\rho_w v_w} \frac{D_m U_{*a}}{\kappa z_a(U_a^*)} \right]^{1/2}} \quad (1)$$

一方、Dobbins(1964)²⁾は開水路流れに表面更新モデルを適用する際に、次式(2)のような表面更新率 r 及び長さスケール L を提案している。

$$r \propto \frac{\rho_w L E_s}{\sigma}, L \propto \left(\frac{v_w^3}{E_s} \right)^{1/4} \quad (2)$$

σ 及び E_s は水の表面張力及び水面近傍での単位質量あたりの乱れエネルギーである。ここで、 E_s 及びフルード数の増加による表面積の増加率 C_A について次式の仮定をする。

$$E_s \propto \frac{1}{2} \rho_w g \eta^2, C_A = 1 + A \eta^2 \quad (3)$$

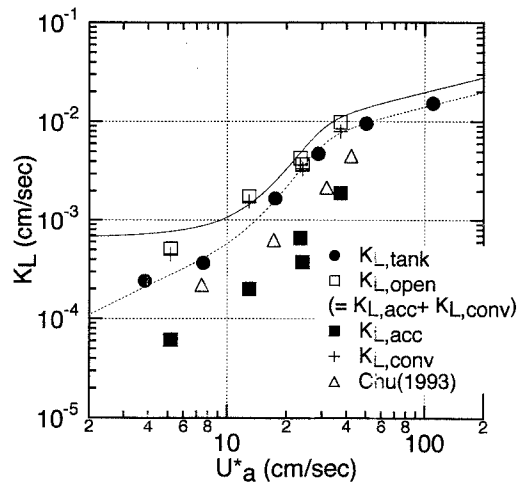
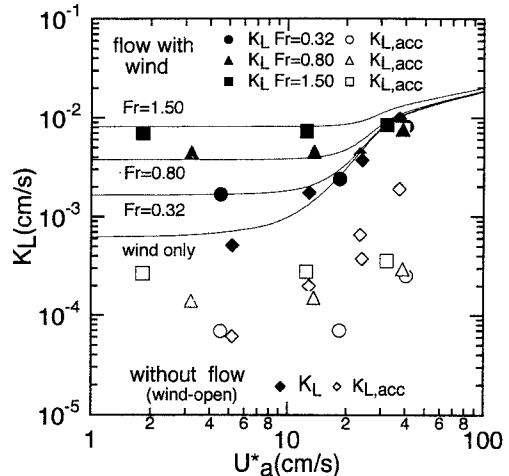
Aは比例定数である。式(2)及び(3)を表面更新モデルに代入すると、 K_L は次式で与えられる。

$$K_L \propto (1 + A \eta^2) \eta^{3/4} \quad (4)$$

4. 実験結果および考察 Eloubaity and Plate(1972)³⁾は風

表-1 水理条件

case	H (cm)	$U_{a,max}$ (m/s)	$U_{w,mean}$ (cm/s)	Fr	U_a^* (cm/s)	U_{*b} (cm/s)
w1f1	4.0	1.49	20.30	0.32	4.52	1.25
w2f1	4.0	4.39	20.26	0.32	18.45	1.20
w3f1	4.0	8.41	20.59	0.33	40.20	1.22
w1f2	4.0	1.49	50.47	0.81	3.20	2.57
w2f2	4.0	4.39	51.83	0.83	13.66	2.61
w3f2	4.0	8.41	59.24	0.95	38.57	2.61
w1f3	4.0	1.49	98.27	1.57	1.82	4.67
w2f3	4.0	4.39	98.64	1.58	12.49	4.77
w3f3	4.0	8.41	101.84	1.63	32.19	4.93

図-1 K_L の分布 (風波)図-2 K_L の分布 (両シアアの混在する流れ)

キーワード：気体輸送係数、摩擦速度、逸散率、小規模渦モデル

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL：075-753-5081 FAX：075-761-0646

波の反流なしの場合の K_L について、断面摩擦速度 $U_{*c} (= ((\tau_b + \tau_s)/\rho_w)^{0.5} = (gHS_b)^{0.5})$ を用いた次式を提案している。

$$K_L = C \frac{U_{*c} H}{\nu} U_{*c} \quad (5)$$

ここで、 τ_b 及び τ_s は底面及び水面でのせん断応力、 S_b は河床勾配である。この式から予想されることは、反流なしの流れにおいては底面摩擦速度 U_{*b} が K_L に影響を及ぼす可能性があるということであり、 U_{*b} の小さい(負の値)反流ありの場合よりも K_L は大きくなると考えられる。図-1は風波の反流なし及びありの場合における K_L の分布である。また、式(1)のO'Connor(1983)¹⁾による半理論解(点線)、及び反流なしに対して U_{*c}/U_{*b} と K_L^{open}/K_L^{tank} の比例関係を考慮した近似曲線(実線)も併示した。これより、反流なしの K_L の分布は反流ありの K_L の分布と類似しているが、 U_{*c} が小さくなるにつれて反流なしの値が若干大きくなっており、近似曲線は実験値と良く一致していることがわかる。図-2は両シアーの混在する開水路流れにおける、 U_{*c} に対する K_L の分布である。また、図中の曲線は両シアーの混在する開水路流れにおける K_L を次式の仮定で求めたものである。

$$K_L = (K_{L,wind}^2 + K_{L,water}^2)^{0.5} \quad (6)$$

ここで $K_{L,wind}$ 及び $K_{L,water}$ はそれぞれ風波(図-1の近似曲線)及び開水路流れ(小規模渦モデル+フルード数の効果)の K_L である。同図よりフルード数が大きいほど U_{*c} に対する K_L の増加率は小さく、風速が速いほどフルード数による増加率が大きく、 K_L には両層の相対流速が大きな影響を及ぼすことがわかる。図-3は風波(反流なし)、開水路流れ及び両者の混在する流れについての、水面変動強度 η' に対する K_L の分布である。図より、風波及び開水路流れの K_L はそれぞれ η' のべき乗に比例(風波： $K_L \sim \eta'^{3/4}$ 、開水路： $K_L \sim \eta'^{11/4}$)しており、風波と開水路流れを比較した場合 η' が同じならば開水路の方が K_L が大きくなることがわかる。これらのべき乗は式(4)において $A \ll 1.0$ 及び $A \gg 1.0$ に対応している。一方、両者が混在する流れの K_L はどちらか一方が存在する場合の間に存在し、フルード数の増加とともに時計回りのループを描くことがわかる。図-4は U_{*c}/U_{*b} に対する K_L/K_{Lb} の分布である。同図には従来から言われているシアーの卓越の判定条件も併示した。図中の点($U_{*c}/U_{*b} = K_L/K_{Lb} = 1$)は風シアーのない底面シアーのみの開水路流れを示す。図より K_L/K_{Lb} は U_{*c}/U_{*b} に比例して増加し、風速の増加とともに底面シアー卓越から風シアー卓越の条件へと移行するが、フルード数の増加とともにその移行は顕著ではなくなることがわかる。一方、図-5は U_{*c}/U_{*b} に対する逸散率 $\varepsilon/\varepsilon_b$ の分布であり、 $\varepsilon/\varepsilon_b$ も K_L/K_{Lb} と同様に U_{*c}/U_{*b} に対して直線的に増加するが、 $\varepsilon/\varepsilon_b$ の増加率は K_L/K_{Lb} よりもかなり大きいことがわかる。以上より両シアーの混在する開水路流れにおいても逸散率と気体輸送特性が密接に関連していることがわかる。

5. おわりに 本研究では、底面シアー及び水面シアーの両者が混在する流れを対象として、その気体輸送特性について評価を行った。

<参考文献>

- 1) O'Connor, D.J. : *J. Environmental Eng.*, ASCE, Vol.109, No.3, pp.731-752, 1983.
- 2) Dobbins, W.E. : *J. Sanitary Eng.*, ASCE, Vol.90, SA3, pp.53-78, 1964.
- 3) Eloubaity, A.F. and Plate, E.J. : *J. Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol.98, HY1, pp153-170, 1972.

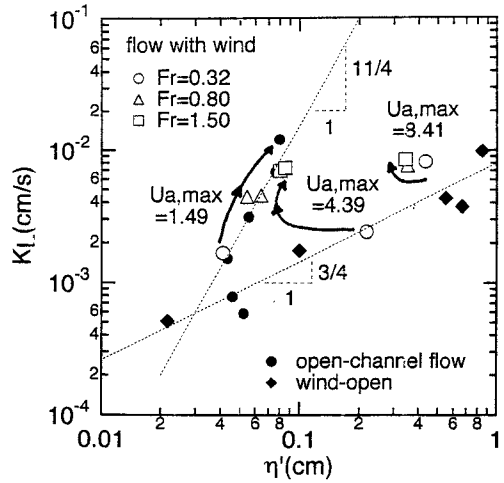


図-3 η' に対する K_L の分布

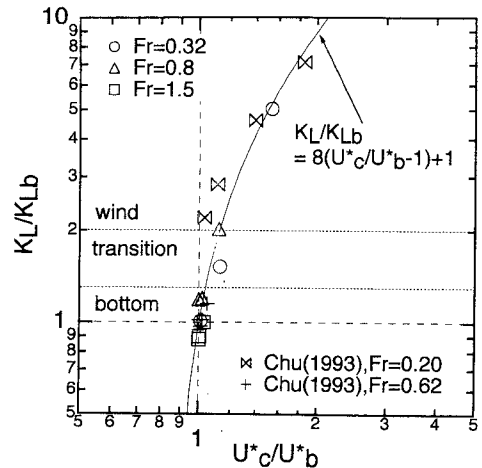


図-4 U_{*c}/U_{*b} に対する K_L/K_{Lb} の分布

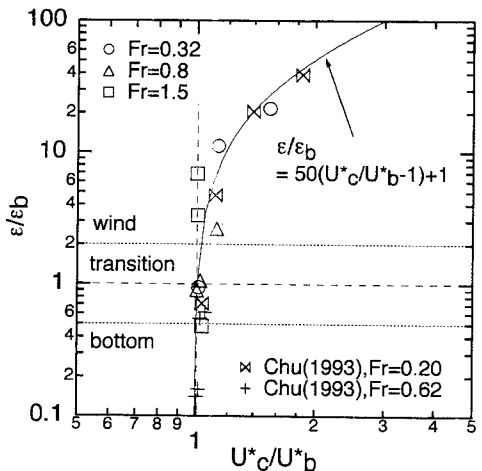


図-5 U_{*c}/U_{*b} に対する $\varepsilon/\varepsilon_b$ の分布