

水表面付近の乱れと酸素移動係数との関係の実験的検討

運輸省 港湾技術研究所 O細川恭史、関根好幸、古川恵太

1. はじめに

湖沼・内湾など比較的滞留時間の長い水域では、溶存酸素濃度の維持の外、有機塩素系化合物の運命・酸性雨によるガス交換など、水面を横切るガスのフラックスの評価が重要になっている。また、大洋に於ける大気との炭酸ガスの交換は地球温暖化にとっても重要な検討課題であるが、ガスの分圧差（つまり、大気と表層海水との濃度差）の測定値は蓄積が進んでいるもののフラックスの測定は難しいようである。一方、ガス交換に関する従来の評価式は、開水路流れに関する流速分布などを参考にした式がほとんどであり、底面粗度長さに対し水深が浅い流れや底面粗度の影響が小さくなる深い流れには適用しづらいものであった。

ここでは、水表面の乱れとガスの移動とを直接関係付、内湾などでの評価に役立てようとする試みの手始めとして、小規模な実験を実施した。

2. 既往の検討例

酸素の移動フラックス N は、液中酸素濃度を C 、飽和濃度を C_s 、水表面積を A 、水体積を V とすれば、

$$N = KL(C_s - C) \quad \text{または} \quad dC/dt = KL(A/V)(C_s - C)$$

ここで、 KL は総括酸素移動係数であり、酸素ガスでは水表面近くの水理量・分子拡散係数等で表される。ガス移動機構の検討から、水理量の内でも水表面付近での乱れ（水平乱れ u' 、鉛直乱れ v' ）や乱れによるエネルギー逸散（ ε ）と結び付けて議論されてきている

水表面での乱れの起源によって大きく3つの方法があるようである。一つは、開水路流れによる乱れを対象としたもので、O'ConnorとDobbins¹⁾、村上²⁾らの半理論式や河川での実測に基づく経験式などがそれぞれある。2つ目が、風による大気からの乱れの生起に対する検討である。風洞水路や円形水路による実験を中心に解析されている。検討例は少ないが、波による乱れを対象とした造波水路実験も行われており、砕波形式や護岸の消波効率による酸素移動係数の変化が示されている。

第1の方法では、やや異なる理論展開ながら、Dobbins³⁾と村上²⁾は KL が ε の $3/8$ 乗に比例している。Lamontら⁴⁾は、流れ全体のエネルギー逸散の $1/4$ 乗に比例している。また、Levich⁵⁾は KL が v' の $3/2$ 乗、平山ら⁶⁾は v' の 1.25 乗に比例している。第2の方法では、Liss⁷⁾が風速の2乗に比例するとした。その後実験例が増えるにつれ、海面での風の摩擦速度 u_* に比例し途中で比例係数が変わる折れ線となる事が、Jähneら⁸⁾によって報告されている。第3の方法では、護岸の消波による波のエネルギー逸散のほぼ 0.5 乗に比例して KL が増えることを演者ら⁹⁾が示している。

第2、3の方法での検討では、水表面での機構については十分に検討が進んでいないため、実験と現地との相似則の問題・外力条件の変化に対する評価式の変化の予想などで不明点が残っている。

3. 実験装置と方法

KL と水表面近傍の水理量とを比較し、滑らかな水表面における酸素溶解過程を支配するパラメーターの抽出を試みた。直径35cm、深さ40cmのホーロタンクを用い、水表面にじょう乱を与え、流速と乱れの分布・酸素濃度の変化を測定した。じょう乱の与え方は、図-1のように回転子を水底で回転させる方法と振動子を水面よりやや深い位置で振動させる方法の2種類とし、個別に与えた。回転子・振動子の形状を表-1に示す。回転による方法では、回転子の水平回転による回転子と水との摩擦により回転流を起こしている。

回転は 90-205rpmの定速回転である。振動は、振幅 3.6-3.7cm周期0.2-2sの往復振動である。平均流速と流速変動を2成分ホットフィルム流速計を用いて1-25点で測定している。サンプリング周波数は100Hz、サンプリング時間は概ね20秒である。また、サーボ式水位計、溶存酸素計（Nester8500）を用いている。

4. 結果

水位変動は、振動系で4-16mm、回転系で2mmと小さく水面は滑らかで碎波や気泡発生がない。回転系では、水面が鍋底型となるが表面積（A）の増加は無視できる。回転系での鉛直乱れ（ v' ）の分布例を図-2に示す。鉛直方向の相対乱れ（ v'/U ）は、表層-1.5cmより浅くなると徐々に減少する。実測流速変動より波数スペクトルに変換し、慣性小領域に対し今本¹⁰⁾の方法で、粘性小領域に対し小松ら¹¹⁾の式でエネルギー逸散率 ε を求めた。図-2に対する ε の分布例を図-3に示す。回転中心から6cm以内、表面から-3.5cm以深では ε が小さくなる。

表面下 -0.5cm, 回転中心と外壁との中央地点での水理量を各実験の代表値とし、KL値と比較した。KLとUとは、じょう乱子毎に傾き・切片とも異なる直線となる。KLと u' 、 v' 、 ε との関係を図-4、5、6に示す。KLは、 u' や v' のほぼ1乗に比例し、バラつくものの ε の0.4乗に比例した。図では、
 $KL \propto u'^{1.0}$ ($r=.905$) $n=17$ 、 $KL \propto v'^{0.9}$ ($.901$) $n=17$ 、 $KL \propto \varepsilon^{0.4}$ ($.606$) $n=9$ 。

5. 解析

風洞実験では $KL \propto u$ であり、大気側 u と水側 u_w とは平衡時1次の比例関係がある。また、鶴谷¹²⁾の示した風による水粒子乱れ強度の分布式によれば、底面摩擦の影響が無視できるとき水表面では $u_w \sim u'$ となる。図-4、5に示す $KL \propto u'$ もしくは $KL \propto v'$ は、風洞実験の結果と傾向が一致する。村上、Dobbinsの示した3/8乗の関係は、図-6の結果と一致する¹³⁾。但し、 v' は水表面付近では表面の影響を大きく受けるためさらに詳しい検討が必要である。限られた実験条件であるため、滑らかな水表面でのガス移動に関しての統一的な扱いのためには更にデーターの蓄積が必要である。

参考文献

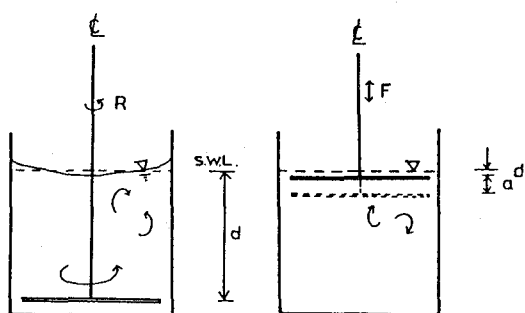
- 1) O'Conner, D.J. et al., Trans. ASCE, 123, 1958, 641-684
- 2) 村上健, 6回講義, 1970, 45-52
- 3) Dobbins, W.E., Jour. S.A. Div. ASCE, 90, 1964, 53-78
- 4) Lamont, J.C. et al., Jour. A.I. Ch. E., 16, 1970, 513-519
- 5) Levich, V.G., Physicochemical Hydrodynamics, Printice-Hall, 1962, 689-700
- 6) 平山公明ら, 下水道協会誌, 17, 1980, 21-30
- 7) Liss, P.S., Deep-See Res., 20, 1973, 221-238
- 8) Jähne, B. et al., J.G.R., 92, 1987, 1937-1949
- 9) 細川恭史ら, 港湾技研資料312, 1979
- 10) 今本博健, 京大防災研年報20A, 1977, 1-20
- 11) 小松利光ら, 30回水講, 1986, 523-528
- 12) 鶴谷広一, 東工大学位論文, 1987
- 13) 細川恭史ら, 港湾技研資料657, 1989

表-1 回転子・振動子の形状

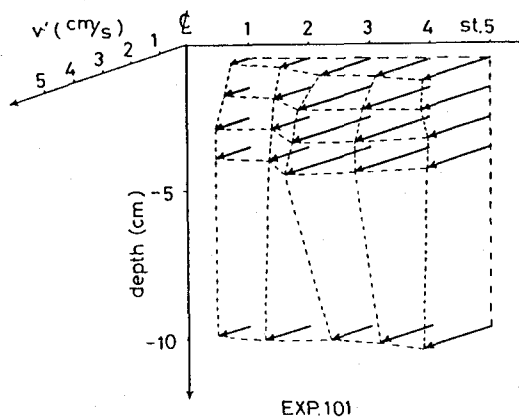
≡(番号)	擾乱発生子	形状	材質	大きさ (cm) (回転直径×短辺×厚)	動く方向
10	十字スライド	薄い長方形板を2枚十字型に組み合せ	プラスチック	30.7×3×0.2	十字を覆かせ薄い板で水を切るように回転
11	スライド	薄い長方形板1枚	プラスチック	30.7×3×0.2	薄い板で水を切るように回転
12	メッシュ	波線を格子に組んだ丸形金網	鉄線 (φ1.6mm)	23.5×-×0.3 格子間隔1.9×1.9	円板を覆かせ水を切るように回転
13	細丸棒	細長い丸棒	木製表面塗装	30×-×0.8	丸棒を覆かせて回転
14	太丸棒	やや太い丸棒	塩化ビニル管	30×-×2.6	丸棒を覆かせて回転
15	水面バドル	正方形の板1枚	アクリル	7×-×- 正方形板3×3×0.2	正方形板をたてて水面付近を回転

回転直径の欄は、回転させてできる軌跡の外周円の直径を示す。

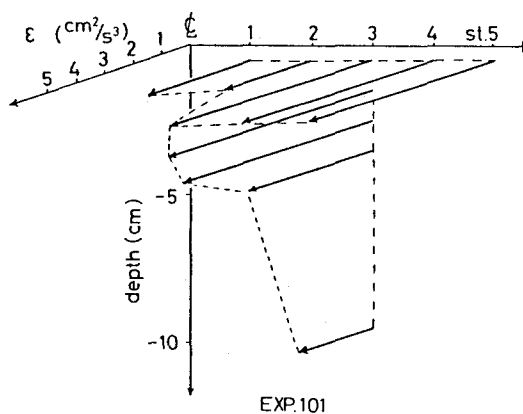
≡(番号)	擾乱発生子	形状	材質	大きさ (cm) (長辺×短辺×厚)	動く方向
21	なす	下がふくらんだ首の細長いなす形	ガラス	最大径4.8×最小径1.4 高さ4.8	なすの首を上にし、上下に振とう
22	メッシュ	波線を格子に組んだ丸形金網 (回転系発生子) (の≡12と同形)	鉄線 (φ1.6mm)	径23.5×厚0.3 格子間隔1.9×1.9	円板を覆かせ、上下に振とう



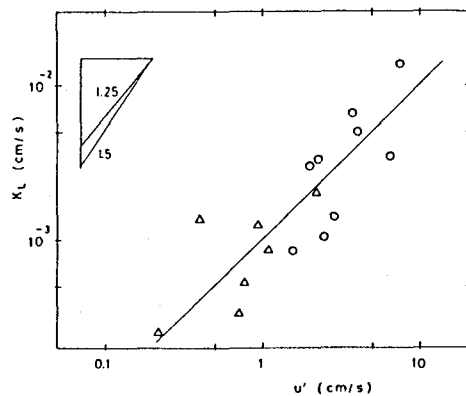
図一1 実験概念図 (回転系・振動系)



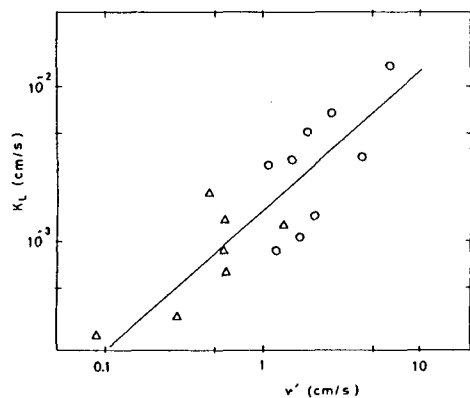
図一2 回転系での鉛直乱れ v' 分布測定例



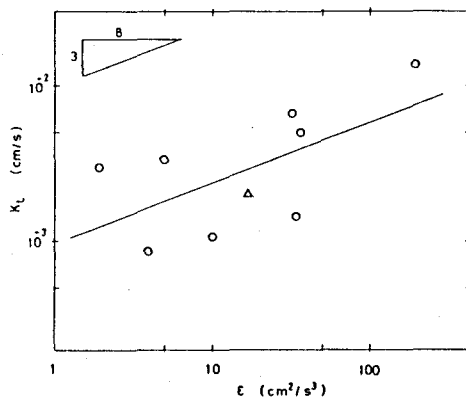
図一3 回転系での逸散エネルギー ε 分布測定例



図一4 KL と u' との関係



図一5 KL と v' との関係



図一6 KL と ε との関係