

山梨大学 正 平山公明
 山梨大学 正 今岡正美
 東京大学 正 松尾友矩

1. はじめに 水中に存在する物質の酸化に要する酸素は、その多くが空気中の酸素に由来している。したがって酸化という現象を扱う限り、空気中から水中への酸素の移動機構がどのようなものであるかということは重要な問題であり、これまでにその機構を明らかにするための実験がいくつかなされている。本実験も、機械攪拌槽での表面ばう気という限られた条件下ではあるが、同様の観点からエネルギー損失量、乱れ強度と酸素移動速度を測定しその関係に検討を加えた。

2. 実験方法 円筒攪拌槽を用い表面ばう気による酸素移動速度を測定した。液体の流動状態をできるだけ多様に変化させることもねらって、攪拌には図-1に示す2種の槽型の羽根(a, b)と円盤型の羽根(c)を用いた。また水槽は直径が15, 20, 25.6, 35 cmと4種類の大きさのものを用い、水深は32 cmで一定とした。羽根の回転速度は40, 80, 120 rpmと3段階に変化させた。実験条件を表-1に示す。

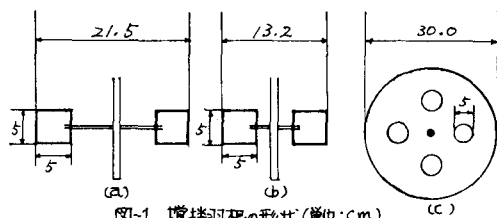


表-1 実験条件

実験 No	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8
攪拌槽直径(cm)	25.6	35.0	35.0	35.0	15.0	20.0	25.6	35.0
攪拌羽根	a	a	c	c	b	b	b	b
羽根の位置(水面)(cm)	21.0	21.0	21.0	4.0	21.0	21.0	21.0	21.0

溶存酸素濃度はガルバニル電極式の溶存酸素計を用いて測定し、酸素移動速度を算出するには次のような要領によった。まず $\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C)$ (1) (C : 溶存酸素濃度, C_s : 飽和溶存酸素濃度, t : 時間) で示される $K_L a$ を計算し $K_L = K_L a \frac{V}{A} = \frac{V}{A} K_L a$ (H : 水深) により K_L を求めた。さらに、「単位時間に単位面積を通して溶け込む酸素量」を表わす指標として K_L に C_s をかけた次式 $q = K_L C_s$ (2) で表わされる q を計算し単位を $[gO_2/m^2 \cdot hr]$ で表わし酸素移動速度を表わす指標とした。乱れ強度の測定はホットフィルム流速計を用いた。測定は水面下 0.5 cm の位置で行い、半径方向に 4~5 点の測定点をとった。そして測定点での面積的な重みと考慮して平均値を求めた。さらに液体に機械的に加えられるエネルギーを知るために、回転式トルクメータによりトルクの大きさを測定した。また得られたトルクの値より式 $E = S \pi T / \rho V$ (3) (S : 回転速度 rpm, T : トルク dyn-cm, ρ : 密度, V : 液体積) を用いて単位質量あたりのエネルギー損失量を計算した。

3. 実験結果と考察 酸素移動速度の測定結果を図-2に示す。この図より羽根の形状や羽根の位置もかなり酸素移動速度に影響を与えていると言える。

Run 1, 2, 4, 5 の 120 rpm では攪拌時に液体がかなり激しく上下に振動していたので以下の図にはこれらの値を省略してある。本実験で得られた酸素移動速度の値は 0.2~1.0 $g/m^2 \cdot hr$ であり河川での再ばう気量は、たとえば江戸川、荒川では 0.2~0.6 $g/m^2 \cdot hr$ また Tennessee 川や Ohio 川ではおおむね 0.2~2.0 $g/m^2 \cdot hr$ であり本実験の酸素溶解速度は実際河川での酸素溶解速度の範囲内にあると考えられる。

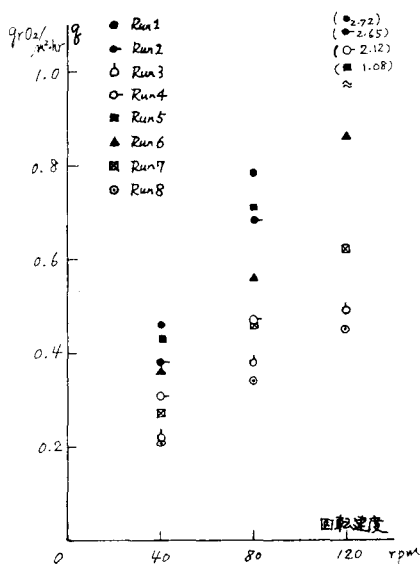


図-2 回転速度と酸素移動速度の関係

平均流速, エネルギー損失量, 平均乱れ強度と酸素移動速度の関係をそれぞれ図-3, 4, 5に示す。図-3, 4から平均流速, エネルギー損失量のみでは酸素移動に支配的な指標と言えず, それ以外の別のパラメータが酸素移動に関与していることが示唆される。

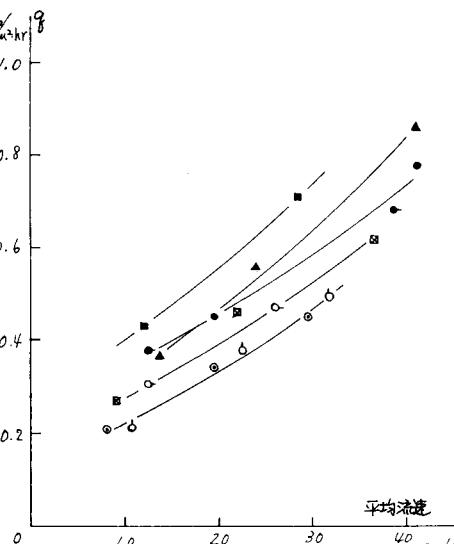


図-3 平均流速と酸素移動速度の関係

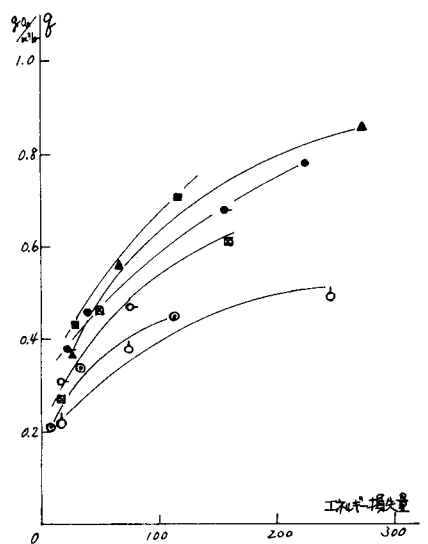


図-4 エネルギー損失量と酸素移動速度の関係

図-5の場合, 乱れ強度が一定の時, Run 5はやや

高いRun 3はやや低いものであるが酸素移動速度はほぼ一定であるといえ, 乱れ強度は他のパラメータと必要とせずほぼそれのみで酸素移動速度を支配していると考えられる。実験データから酸素移動速度と乱れ強度(ν)の関係は $q \propto \nu^{1.2}$ ——(4)において $n \approx 1.2$ であると推測される。エネルギー損失量はエネルギー消散率 ε に相当する。 ε をエネルギースペクトル関数 $E(k)$ で表わすと $\varepsilon = 2\nu \int k^2 E(k) dk$ となり, 一方 ν は $\nu^2 = \int E(k) dk$ となる。両者を比較すれば ε はスペクトル関数に重み k^2 をかけていることから相対的に高い波数部分に重きを置いた評価をしていることになり, 平衡領域に対しては最小渦径が ε と ν から計算される。これに対して ν は ε よりも相対的に低い波数の影響を重視していることになる。酸素移動速度が ν に強く依存しているということは, 酸素移動にはスペクトルのエネルギーの高い領域が主に関与していると考えられる。

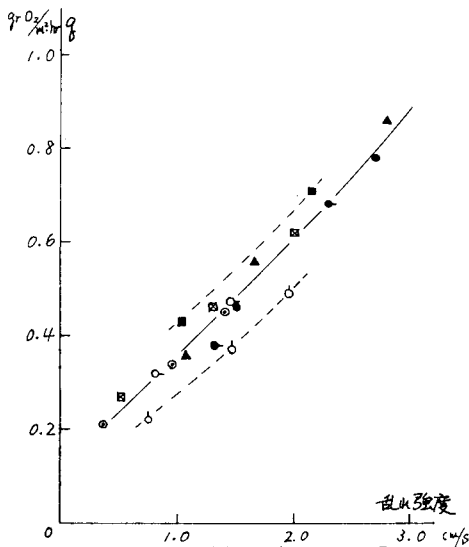


図-5 乱れ強度と酸素移動速度の関係

そうするとDandkwertsによる式 $K_L = \sqrt{Dm} \Gamma$ ——(5) (Dm : 分子拡散係数 Γ : 表面更新率) の Γ を求める際に最小渦を考えるのは適切でないと思えるので次のように考える。

Γ は [1/時間] の次元をもつので単位質量あたりのエネルギー E と動粘性係数 ν とから [1/時間] の単位をもつものをつくらせると $(E/\nu)^{1/2}$ となる。エネルギーとして運動エネルギーの乱れ成分のようなもの, すなわち $\frac{1}{2} m \nu^2$ と考えれば $E = \frac{1}{2} m \nu^2 / m t$ $= \frac{1}{2} \nu^2 / \ell \nu = \nu^3 / 2\ell$ ——(6) (ℓ : 長さのスケール) となる。 ℓ は表面近くのスケールを考えるべきであり, それが表面張力と乱れ強度により定まると考えると $\ell \propto \sigma / \rho \nu^2$ ——(7) (σ : 表面張力) となる。これを(6)に代入すれば $E \propto \nu^{5/3} / \sigma$ となりさらに(5)に代入すれば $K_L \propto \nu^{1/25}$ が得られ実験結果に近い指数となる。

4. まとめ 酸素移動には乱れ強度が支配的な要因となっており, また波数領域においては乱れエネルギーの高い領域の影響が大きいことが推測される。

- 参考文献 1) 村上「河川における再拡散」第6回衛生工学研究討論会講演集 2) E. Dobbs 「BOD and Oxygen Relationships in Stream」ASCE, SA3, 1949
3) 平松松「円筒型機械攪拌槽を用いた酸素移動に関する実験的研究」第14回結果 II-315 4) 平松, 今岡, 松尾「表面における拡散に関する基礎的研究」第2回水質汚濁研究に関するシンポジウム講演集(1978)