

山梨大学 正 平山公明

東京大学 正 松尾友矩

1. はじめに 酸素の溶解速度に及ぼす水温の影響については、いくつかの報告がみられる。^(1,2) 多くの場合、水温の影響は、温度係数と呼ばれる式中の θ で表わされ、 θ の値は 1.016 ~ 1.047⁽¹⁾ であることが知られている。

$K_{2,T} = K_{2,20} \theta^{T-20}$ — (1) ($K_{2,T}$: T での再びう気係数, $K_{2,20}$: 20°C での再びう気係数, T : 温度) 温度係数は、水路や攪拌実験により求められているが、攪拌実験の場合について考えると、求められた温度係数は、スターラヤ攪拌羽根の回転速度 (以後、攪拌速度と呼ぶ) が一定である時の、 K_2 の温度変化を表わす指標である。しかし、水温が変化するという事は、水の粘性が変化するという事であるから、攪拌速度が一定であっても、攪拌槽内の水の動きは変化する可能性がある。そこで、今回、水温が変化した時の流速変化の有無を知るために、プロベラ流速計を用いて流速の測定を行い、酸素移動係数 K_L と物理量との関係に、若干の考察を加えた。

2. 実験方法 実験装置の概略を図-1に示す。攪拌槽は直径 25.6 cm の円筒型のもを用い、これを恒温水槽中に浸すことにより、水温の調節を行った。水量は 16.5 l、水深は 32 cm とし、水道水を使用し、5 cm × 5 cm の 2 枚の羽根を回転させることにより、流速を与えた。水温は、およそ、5, 10, 15, 20, 25, 30, 35°C の 7 段階に変化させ、羽根の回転速度は、40, 80, 120 rpm の 3 通りに変化させた。また、初期の溶存酸素の除去には窒素ガスをを用い、溶存酸素濃度の時間変化から、(2) 式、(3) 式を用いて K_2 および K_L の値を算出した。

$\frac{dC}{dt} = K_2(C_s - C)$ — (2) $K_2 = K_L A \sqrt{V} \div H$ — (3) (C : 酸素濃度, t : 時間, C_s : 飽和酸素濃度, A : 気液接触面積, V : 水の体積, H : 水深)

流速は、いくつかの温度であらかじめ、流速と出力の関係を求めておいた流速計を用いて、半径方向に、槽壁から 1, 3, 6, 7.5 cm の 4 点で測定した。ただし、120 rpm の場合は、1, 3, 6 cm の 3 点のみとした。流速計の位置は、水面下 0.6 cm とした。

3. 実験結果 再びう気係数 K_2 の測定結果を図-2に示す。これらの値から、最小自乗法を用いて温度係数の値を求めると、40 rpm の場合、 $\theta = 1.029$, 80 rpm の場合、 $\theta = 1.027$, 120 rpm の場合、 $\theta = 1.010$ が得られる。回転速度が 120 rpm の場合には、水の動きが非常に激しく、現象も複雑化しているようで、図-2における直線からのずれも、他の 2 つの場合に比べて大きくなっている。これらの値と他の研究者の値と^(1,2) 比較してみると、120 rpm の場合はかなり低い値、40 rpm と 80 rpm の場合は、わずかに高い値となっている。

各水温における槽内の平均流速を表-1に示す。これらの値は、半径方向に数か所で測定した値に、面積的な荷重をかけて、平均値としたものである。この表からは、水温の変化にともなう流速の変化には、一定した傾向が見い出せず、水温の変化にともなう

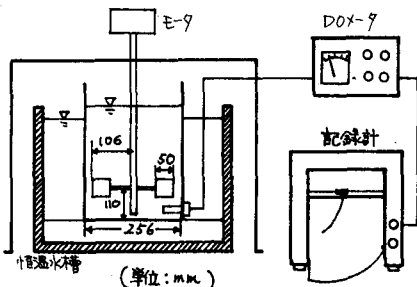


図-1 実験装置の概略

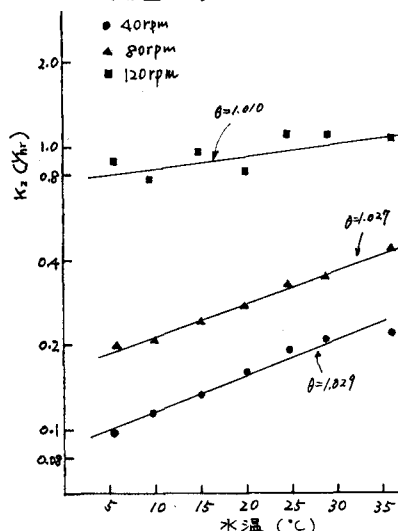
図-2 K_2 の測定結果

表-1 各温度での平均流速

水温(°C)	5.0	8.9	15.2	18.6	24.9	29.0	34.9
40 rpm	15.8	17.3	18.3	16.2	19.2	17.7	18.6
80	37.2	35.1	39.0	38.6	37.8	37.3	37.3
120	58.3	53.8	59.6	52.3	54.4	54.4	52.1

流速の変化は、ほとんどないものと思われる。

4. 考察 動粘性係数や表面張力の温度依存性についてはよく知られているので、ここで、次元解析を用いて酸素移動係数と物理量との関係を検討する。その関係は、どのような物理量と基本量として取りあげるかによって変わってこようが、ここでは、酸素移動係数 K_L 、水中での酸素の分子拡散係数 D_m 、動粘性係数 ν 、表面張力 σ 、密度 ρ 、平均流速 v ととりあげて考察する。それぞれの次元は、 $[K_L]=L^2T^{-1}$ 、 $[D_m]=L^2T^{-1}$ 、 $[\nu]=L^2T^{-1}$ 、 $[\sigma]=MT^{-2}$ 、 $[\rho]=ML^{-3}$ 、 $[v]=LT^{-1}$ であるので、これらの物理量から $\sigma/\rho\nu K_L$ 、 ν/D_m 、 $\sigma/\rho\nu v$ の3つの無次元量が得られる。

これらの無次元量の間に指数的な関係を仮定すると、 $\sigma/\rho\nu K_L = A_1(\nu/D_m)^m(\sigma/\rho\nu v)^n$ —(4)となる。さらに、Dandewertsの表面更新モデルを仮定すると、 $K_L \propto D_m^{1/2}$ であるから $m=1/2$ となる。この値を(4)式に代入すると、(4)式は、 $(\sigma/\rho\nu K_L)(D_m/\nu)^{1/2} = A_1(\sigma/\rho\nu v)^n$ —(5)となる。したがって、 $(\sigma/\rho\nu v)$ の値に対して $\{(\sigma/\rho\nu K_L)(D_m/\nu)^{1/2}\}$ の値を両対数紙にプロットすれば、その傾きから n の値が求まる。このようにして図3から n_1 を求めると、40, 80, 120rpmに対してそれぞれ、1.04, 1.03, 1.53が得られる。なお、計算にあたっては $D_m = 1.28 \times 10^{-7} (T/\mu) [cm^2/sec]$ (T :絶対温度、 μ :粘性係数単位は cp)の関係を使い、 ν , ρ , μ は「混合液粘度の理論」(石川鉄彌, 丸善)、 σ は「標準水理学」(本間仁, 丸善)より引用した。一方、(4)式において、Lewis & Whitmanの境膜モデルを仮定すると、 $K_L \propto D_m$ であるから $m=1$ となり $(\sigma/\rho\nu K_L)(D_m/\nu) = A_1(\sigma/\rho\nu v)^n$ —(6)の関係が得られる。図3の場合と同様に、図4より n_2 を求めると、40, 80, 120rpmに対してそれぞれ2.39, 2.14, 2.50が得られる。120rpmの回転速度の時には、水の動きが激しく、羽根の回転とともに水が上下に振動するような現象もみられたので、40と80rpmの場合の値について考える。表面更新モデルを仮定した場合には、 $n_1 \approx 1.04$ となり、この値を(5)式に代入して K_L を求めると、 $K_L \propto D_m^{0.5} \nu^{0.46} \rho^{0.04} \sigma^{-0.04} v^{1.04}$ —(7)となる。一方、境膜モデルを仮定すれば、 n_2 は平均で2.27となり、(6)式に代すると、 $K_L \propto D_m^{1.27} \nu^{1.27} \rho^{1.27} \sigma^{1.27} v^{2.27}$ —(8)の関係式が得られる。(7)式と(8)式の ν と σ の指数に注目すると、(7)式はいずれもマイナスの値になっているのに対して、(8)式では ν の指数がプラスの値になっている。つまり(8)式は、粘性が酸素の移動を促進させる働きを持つことになり、粘性のもつ物理的な意味とは矛盾する結果であると示えられる。したがって、攪拌槽内での酸素の溶解現象に対しては、境膜モデルよりも、表面更新モデルの方が妥当性が高いと判断される。

5. まとめ 攪拌速度が一定の場合、水温の変化にともなう槽内の流速の変化には、明確な傾向がなかった。また、攪拌槽での酸素溶解現象は、境膜モデルよりも、表面更新モデルに従う現象であると推測される。

(参考文献) 1) "Effects of Temperature on Stream Aeration", I. Metzger, P.A.S.C.E. 54-6, 1968, P.1153. 2) "酸素移動におよぼす温度の影響について" 松本俊一郎, 30回講義, 1975. 3) "移動論—熱・物質・流体運動量" 小林清志, 朝倉書店, P.222.

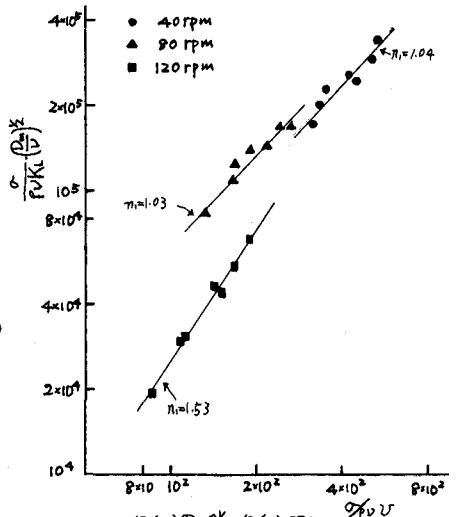


図3 $(\sigma/\rho\nu K_L)(D_m/\nu)^{1/2}$ と $(\sigma/\rho\nu v)$ の関係

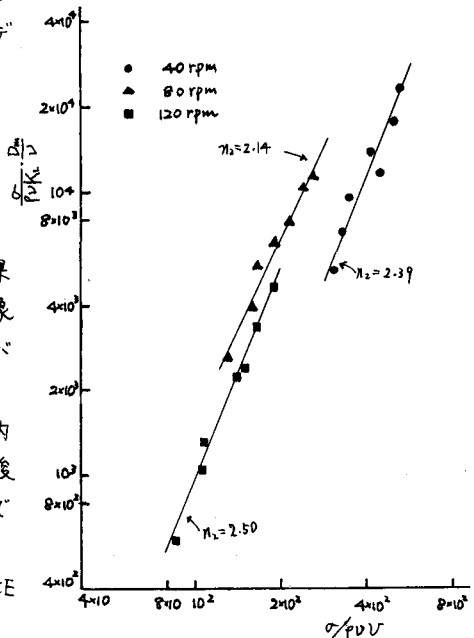


図4 $(\sigma/\rho\nu K_L)(D_m/\nu)$ と $(\sigma/\rho\nu v)$ の関係