散気式エアレーションタンクの酸素移動

建設省土木研究所　正員　　相谷　衛
〃　　　　　　　　〃　　　安中徳二
〃　　　　　　　　〃　　○及川直也

1　まえがき

活性汚泥法における散気式エアレーションの研究は、その基礎的研究も含めて、多くの研究者によって行なわれてきた。しかし、この種の研究の多くは比較的小型のタンクを利用して行なわれたものであり、大型タンクでの実験はKingのChicagoでの実際池を用いての実験(1)、MorganとBewtraのIowa大学の大型モデルタンクでの実験(2)など比較的少ないものである。

筆者らは散気盤による旋回流式エアレーションタンクについて、その水理的、経済的な解明を行なうべく、巾員5.6 m、有効水深3.5 mの大型タンクを用いて実験を行なってきた。その結果の1部はすでに報告済であるが(3)(4)、本文では空気量、気泡径の酸素移動への影響についての実験結果を中心に報告することとしたものである。

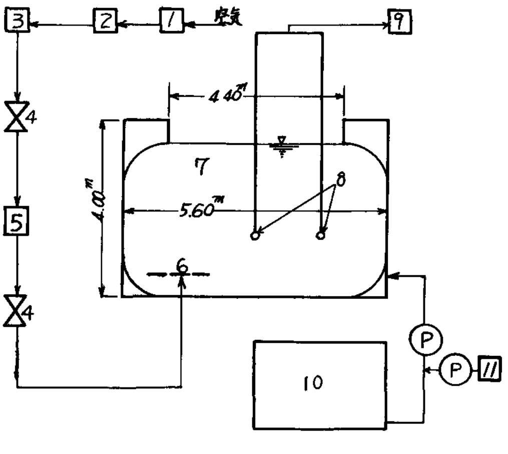
2　実験装置、実験条件など

2−1　実験装置

実験装置は巾員6 m、高さ4 m、奥行2 mの2個の水槽を主体として構成されている。この水槽の1個には有効巾員5.6 m、（大気接觸部での巾員4.4 m）、有効水深3.5 m、（散気盤上の水深3.0 m）、奥行2 mの散気式エアレーションタンクの1部を形作ってある。他の1池は脱酸素用の貯水槽として利用できるようにしてある。ブロワーからの加圧空気はエアレーションタンク内の水温と同じになるよう冷却した後、プロペラ型の空気計量装置で計量してタンク内に送込むようにしている。タンク内にセット出来る散気盤は最大3列で、1列当り5枚を並べうる。散気盤1枚の大きさは30cm×30cmであるが、散気盤の周辺部を1cmずつビニール塗料によって閉塞させてあるので、有効面積は28cm×28cm=784cm²である。エアレーションタンク内の散気盤面積比は散気盤1列について5%である。なお図−1には実験装置のフローシートを示した。

図−1　実験装置フローシート

1. フィルター　2. ブロアー　3. 冷凍機　4. バルブ　5. 風量計　6. 散気板　7. エアレーションタンク　8. 電極　9. 記録計　10. 貯留槽　11. 亜硫酸ソーダ注入タンク



2−2　散気盤の通気率

実験に使用した散気盤は4種類であり、公称通気率600 cc/min/cm²、1,200 cc/min/cm²、1,800 cc/min/cm²

および2,400cc/min/cm²である。(以下通気率の単位を省略する。)このうち、公称通気率600は市販のブランドール#60であり、他の3種はNGKのセラミック散気盤である。

セラミック散気盤のうち、公称通気率1,800は市販品であり、他の2種は特注品で、ともに通気率が±3%以内となるものを選定して使用した。使用した散気盤通気率の平均、最大、最小は表-1のとおりである。

表1　実験に使用した散気板の通気率

公称	600	1200	1800	2400
平均通気率	680	1215	1820	2471
最大通気率	740	1255	1840	2520
最小通気率	580	1180	1800	2410

2-3　実験条件、実験方法

実験は次の諸条件を組合せることによって実施したものである。

散気盤面積比　10%，5%　(ただし，5%については散気盤通気率1,800のみ実施した)

散気盤通気率　600，1,200　1,800，2,400

空気吹込量(ℓ/min/m³)　9，18，27，35

各空気吹込量に対する気泡径の測定は散気盤上，10cm，125cm，225mmの位置にカメラをセットし，300mm望遠レンズを用い，シャッター速度1/1,000で撮影した。撮影した気泡は，その写真より長径をa，短径をbとし，ノギスを用いて0.05mmまで測定した。

総括酸素移動係数KLaの測定は水道水を利用し，あらかじめこれを貯留槽に貯めた後，実験用エアレーションタンクにギヤポンプを用いて移動させる際に，塩化コバルトを触媒として亜硫酸ソーダ溶液にて脱酸素した水を使用した。溶存酸素の測定は2個のE.I.L社製DOメータを用い，記録計に記録させた。総括酸素移動係数KLaは溶存酸素の時間変化を記録結果より読みとり，次式-(1)によって算出し，式-(2)によって20°Cの数値に換算した。

$$K_La_{(T)} = 2.303 \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \log_{10}\frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$K_La_{(20)} = K_La_{(T)} / 1.024^{T-20} \quad \cdots\cdots (2)$$

ここに，　C_s：エアレーションタンク内の飽和溶存酸素濃度

t_1, t_2：時刻

C_1：時刻 t_1 における溶存酸素濃度

C_2：時刻 t_2 における溶存酸素濃度

$K_La_{(T)}$：温度T°Cにおける総括酸素移動係数

$K_La_{(20)}$：温度20°Cにおける総括酸素移動係数

3.　気泡径と空気吹込量

写真撮影された気泡はその形状から回転楕円体とみなすことができたので，長径，短径をノギスにて測定して体積の算定を行ない，更に同体積の球として球相当径に換算した。図-2は気泡の体積(または球相当径)がその位置によってどの程度変化し，またバラツキの度合はどの程度のものであるかを散気盤通気率600，空気吹込量18ℓ/min/m³を1例として図示したものである。同図より当然のことながら，水面に近い位置にある気泡ほどその体積(または球相当径)が極めて大きくなると共に

その気泡体積（または球相当径）のバラツキが大きくなるのが認められる。しかし同図の傾向からみて、気泡が水面附近で破壊されて小粒径のものに分かれたということは見い出されない。このように散気盤から発生された気泡は観測位置によって、その体積のほか、バラツキの状態も異なるので、測定は水深方向について少なくとも3点は必要ではないかと考えられた。

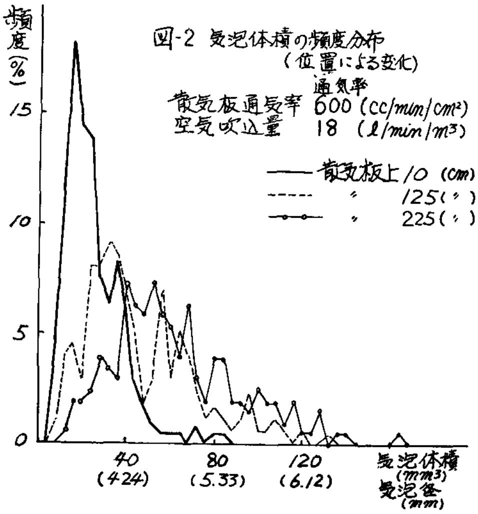


図-2 気泡体積の頻度分布（位置による変化）

図－3は使用した4種の散気盤について同一空気量を噴出させたときの気泡体積（または球相当径）の頻度分布を図示したものである。散気盤の通気率は600を除いては、その差異が±3%以内となるのを使用したが、同図に示したように通気率が大きいほど、バラツキの程度は高くなった。

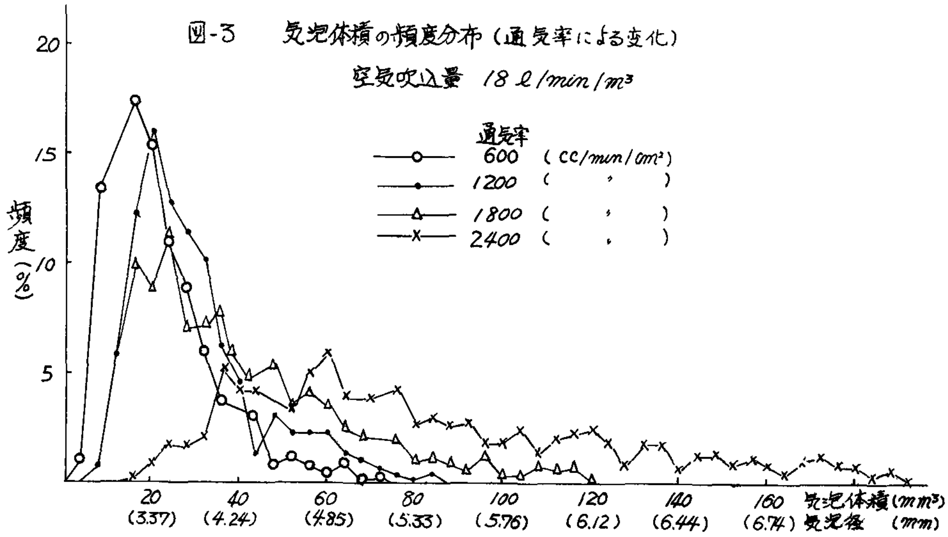


図-3 気泡体積の頻度分布（通気率による変化）

とくに通気率2,400では気泡体積（または球相当径）は20mm³から180mm³（3.37mmより7.00mm）までほぼ一様に分散しているよう見受けられた。本実験で使用した通気率差±3%以内の散気盤でもこのように大きな変化があったが、実際池で使用されている散気盤は±10%以上になるので、気泡体積の差異はもっと大きなものとなると予想される。

エアレーションタンク内の水深方向3測点で撮影した気泡は平均体積を求めた後、気泡径の荷重平均も求めた。この測定は散気盤を1～3列について実施したものであり、これを散気盤1列の場合の空気量に換算して図示すると図－4のとおりである。同図より気泡径（荷重平均値）と空気量との関係は次式のように示される。

散気盤通気率 600 の場合　$d_1 = 2.67\ G^{0.195}$

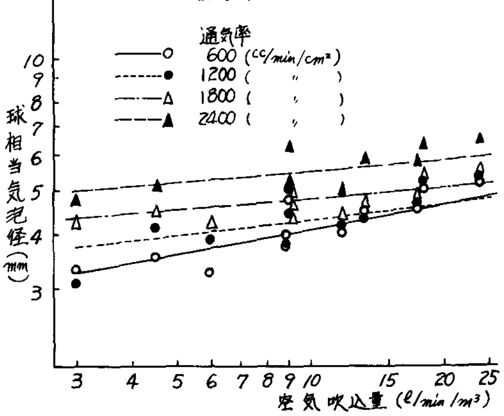
〃 1,200の場合　$d_2 = 3.29\ G^{0.121}$　……(3)

散気盤通気率 1,800 の場合　$d_3 = 3.81\ G^{0.072}$
〃　2,400 の場合　$d_4 = 4.57\ G^{0.081}$　------------------------- (3)

たゞし，d_i：散気盤各通気率における
　　　　　気泡の球相当径（mm）
　　　G：空気量（$l/min/m^3$）

4. エアレーションタンク内の飽和溶存酸素濃度

図−4　空気吹込量と気泡径



式−(1)を用いて総括酸素移動係数 K_La を求めるためには飽和溶存酸素濃度を求めなければならない。大気圧下における飽和溶存酸素濃度は詳細な調査によってその値が知られているが，エアレーションタンク内の飽和溶存酸素濃度はそれよりもやゝ高くなることが知られている。散気式エアレーションタンクでは空気はタンク底部（通常3〜5m）より気泡として放出される。このため，発生した気泡内の酸素分圧は増加し，これに応じて水中の飽和溶存酸素が増加することになる。しかし実際にどの程度の数値となるかは不明であるので，本実験では溶存酸素計の目盛が不動となるまでエアレーションを継続して，タンク内部の飽和溶存酸素濃度を実測した。この結果，大気圧下における水中の飽和溶存酸素濃度 C_w と実測によるエアレーションタンク内飽和溶存酸素濃度 C_s との比 C_s/C_w は20回の測定について 1.060〜1.140 の範囲にあり，平均値は 1.108 となった。

エアレーションタンク内での平均的な飽和溶存酸素濃度を与える実用式として Oldshue の式がある。[5]

$$C_s = C_w \left(\frac{P_b}{29.4} + \frac{O_t}{42} \right) \quad \text{------------------------} (4)$$

たゞし，C_s：エアレーションタンク内の平均的な飽和溶存酸素濃度（ppm）
　　　C_w：大気圧下における水中の飽和溶存酸素濃度（ppm）
　　　P_b：空気吹込位置における絶対圧力（lb/in^2）
　　　O_t：散気盤を離れる空気中の含有酸素濃度（%）

筆者らが実験に使用したエアレーションタンクでの実験条件を適用し，気泡の平均的な酸素吸収率を10%とすると，

$$C_s = 1.104\ C_w \quad \text{------------------------} (4')$$

となり，実験結果にほゞ一致した。これより，Oldshue の与えた式−(4)を用いてエアレーションタンク内の平均的な飽和溶存酸素濃度を求めても，実用的には差支えないことがわかった。

5. King の酸素吸収量算定式の適用性の検討

散気盤を用いた旋回流式エアレーションタンクの酸素吸収量の測定は King によって行なわれ，1955年に発表されている。[1] King によって与えられた酸素吸収量（ppm/hr）を水中の溶存酸素不足量

で割れば、総括酸素移動係数を求めうる。いま、King の酸素吸収量算定式を総括酸素移動係数に直して示すと、式-(5), (6) に示すとおりとなる。

散気盤面積比 5% の場合 $K_L a = \frac{N}{D} = \frac{0.0243 \cdot H^{0.71} \cdot D^{y-1} \cdot G^{x} \cdot (1.024)^{T}}{d^{0.64}}$ ……………… (5)

散気盤面積比 10% の場合 $K_L a = \frac{N}{D} = \frac{0.0175 \cdot H^{0.75} \cdot D^{y-1} \cdot G^{x'} \cdot (1.024)^{T}}{d^{0.70}}$ ……………… (6)

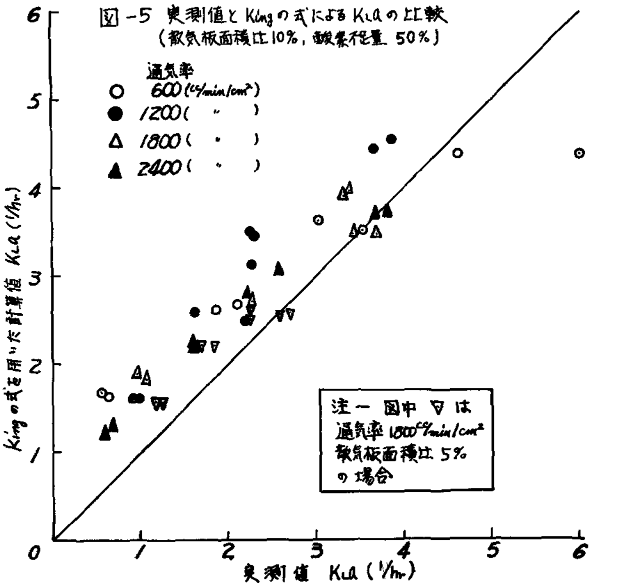
ただし、$K_L a$：総括酸素移動係数（1/hr）
N：酸素吸収量（ppm/hr）
D：酸素不足量（ppm）
H：散気盤までの水深（ft）
G：空気量（cfm/1000 cf の水、60°F, 29.3 in-Hg）
d：気泡の平均径（in）
y：$1/H^{0.1}$
x：$0.85/H^{0.05}$
x'：$0.9/H^{0.04}$
T：温度（°C）

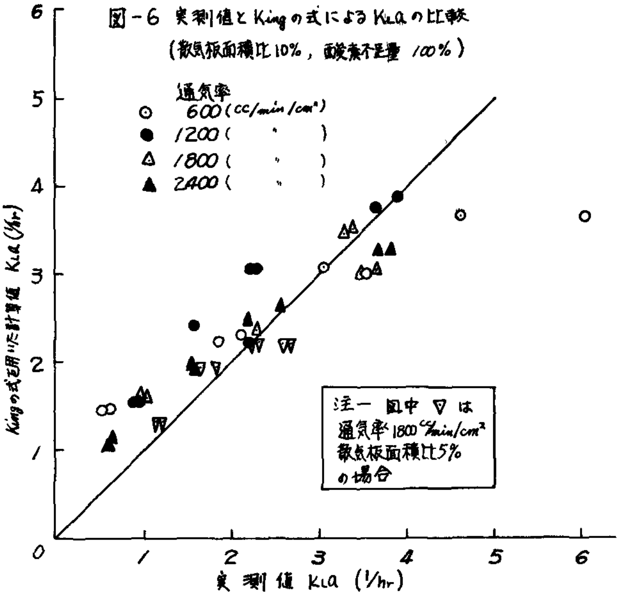
King は式-(5), (6)の適用範囲として、次のように与えている。
気泡径 0.1～0.2 in
散気盤までの水深 1～25 (ft)
水温 8～25°C
溶存酸素濃度は大気圧の飽和値の50%以下

それ故、気泡径が適用範囲内にあれば、本実験から得られた気泡の球相当径を用いてKing式による総括酸素移動係数 KLa を計算することができる。

この計算値と式-(1), (2)を用いて実測の総括酸素移動係数 KLa を比較すると 図-5, 図-6 に示すとおりである。両図は散気盤面積比 10% を中心に図示してあり、散気盤通気率5%の場合は通気率 1,800 のみ示してある。

図-5 は酸素不足量50%の場合、図-6 は酸素不足量 100% の場合である。このように King 式を用いて計算





すると酸素不足量のとり方によって K_La は変化する。両図とも King 式による K_La は実測による K_La を上廻る場合が多い。とくに酸素不足量比が50%，またはその附近では King 式による計算値は実測値をかなり上廻る。King 式による清水の酸素吸収係数 C は 1.0 であり，下水は C<1.0 なることが知られているが，清水を用いた本実験においては酸素不足量比 50% の場合には C≒0.75 となった。酸素不足量比が100%，またはそれに近い位置では King 式による計算値と実測値は K_La が 2～4 (1/hr) の附近で比較的一致した結果が得られた。

6. 空気吹込量と総括酸素移動係数 K_La

空気吹込量が増加すると総括酸素移動係数 K_La は大きく変化した。これは図－7に示すとおりである。同図にみられるように，実験を行なった4種類の散気盤のうち，通気率 1,800 を除いては，通気率が小なるほど K_La は大となり，同一空気吹込量の場合に通気率による影響は 50% 以上に達していた。これは 3. で述べたように散気盤の通気率が小なるほど，発生する気泡径が小さく，したがって，気泡全体の表面積が増加して，K_La が大きくなるためと考える。

図－7にみられるように空気吹込量と K_La との間には直線関係が認められる。すなわち，

$$K_La \propto G^k \qquad (7)$$

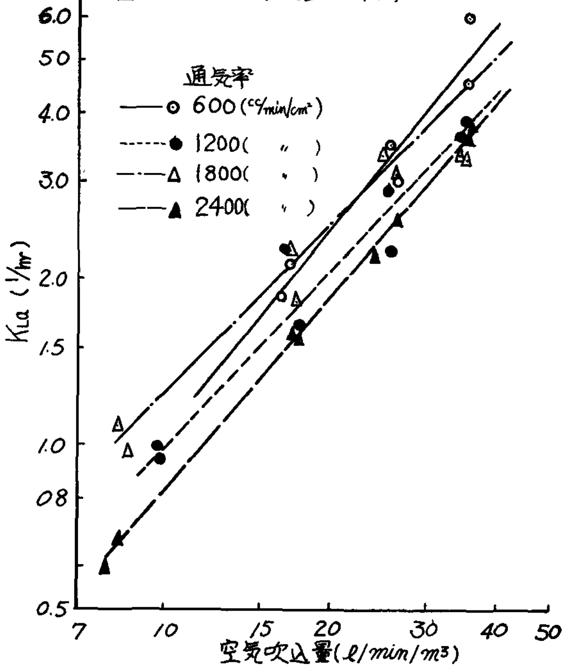
ただし　G：空気吹込量

　　　　k：常数

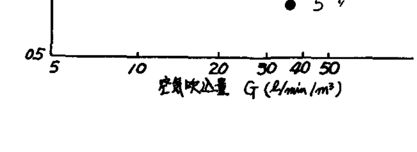
Eckenfelder は K_La を与えるものとして，水面からの再ばっ気量を無視して式－(8) を与えている。[6]

$$K_La = F \cdot G^{(1-n)} \cdot H^{(1-g)} \qquad (8)$$

図－7　K_La と空気量の関係



図－8　散気板面積比が異なる場合の空気量と K_La の関係



たゞし，F, n, g：常数

H：散気盤上の水深

本実験についてみた場合，Hは一定であるから，

$$K_La \propto G^{(1-n)} \quad \cdots\cdots (9)$$

となる。また前述のKing式においてもHを一定として

$$d \propto G^n \quad \cdots\cdots (10)$$

なる関係を与えてやれば，

$$K_La \propto G^m \quad \cdots\cdots (11)$$

となり，式-(7)はEckenfelder，Kingによって与えられた空気吹込量とKLaとの関係に一致する。それ故，図-7の結果を最小自乗法を用いて計算し，空気吹込量とKLaとの関係を求めると次のようになる。

$$\left.\begin{array}{llll} \text{散気盤通気率 } 600, & \text{散気盤面積比 } 10\% \text{ の場合} & K_La = 0.0556\,G^{1.27} \\ \quad〃 \quad 1{,}200, & 〃 \quad 〃 & K_La = 0.0823\,G^{1.08} \\ \quad〃 \quad 1{,}800, & 〃 \quad 〃 & K_La = 0.161\,G^{0.933} \\ \quad〃 \quad 2{,}400, & 〃 \quad 〃 & K_La = 0.0533\,G^{1.19} \\ \quad〃 \quad 1800, & 〃 \quad 5\% \text{ の場合} & K_La = 0.225\,G^{0.761} \end{array}\right\} \cdots\cdots (12)$$

［たゞし，KLaの単位は1/hr，空気吹込量Gの単位はl/min/m³］

このようにGの指数が比較的大きいので，KLaに与える空気吹込量の影響は非常に大きい。

Eckenfelderによる空気吹込量とKLaとの関係は式-(9)に示すとおりであるが，常数nの値は気泡径と空気吹込量の関係で与えられる式-(10)によるとしている。筆者らが気泡径と空気量との関係から得たnの値を散気盤4種類について求めると，散気盤面積比10%の場合について次のように求められる。

$$\left.\begin{array}{lll} \text{散気盤通気率 } 600 & K_La \propto G^{0.805} \\ \quad〃 \quad 1{,}200 & K_La \propto G^{0.879} \\ \quad〃 \quad 1{,}800 & K_La \propto G^{0.908} \\ \quad〃 \quad 2{,}400 & K_La \propto G^{0.927} \end{array}\right\} \cdots\cdots (13)$$

式-(13)によるGの指数は0.80〜0.93の範囲にあり，これはKingの実験結果から求めたGの指数である0.6〜0.8と，著者の実験より求めた式-(12)によるGの指数とのほゞ中間に位置する値である。式-(12)(13)においてGの指数が他の実験者による数値よりも大きくなったことについては表-2に示した他の実験者と著者らの実験結果との気泡径の差異によって説明することができる。表-2に示した通気率600ではPasveerの実験[7]も，著者らの実験もプラニドール#60の散気盤を使用しているが，気泡径としては1mm以上の差異が生じている。Beckの調査[8]では通気率1,200の散気盤が使用されているが，Pasveerの実験と同様に1mm以上の差がある。Kingの実験では散気盤各種について実験が行なわれており，著者らが使用したと同様の通気率1,200，1,800，2,400の散気盤による実験結果も見い出される。しかし，Kingの実験では気泡径は直接測定しておらず，自己の酸素吸収量算定式より逆算して気泡径を求め，それとBeckの実験結果を比較して，その正当性を論

じている。これら過去においてなされた研究は水深の浅い実験用エアレーションタンクを使用しており、このようなタンクでの気泡径は水深の如何にかかわらず、ほとんど一定と考えて差支えない。しかし本実験で使用した散気盤上水深が3mにも達するエアレーションタンクでは図－2に示したように気泡径は水深によって大きく変化する。それ故、著者らは上中下3点について気泡径の観測を行ない、各種計算ではその平均を使用した。このように過去においてなされた各種の気泡径における調査結果と、実際規大の水深を有する模型エアレーションタンクを用いた本実験での気泡径に関する調査結果とは異なるのが当然であり、式－(12)(13)のGの指数は大きなものとなった。

表－2　気泡径の比較

事項 ＼ 通気率	過去の調査			著者らの調査	
	実験者	水深 (cm)	平均気泡径 (mm)	水深 (cm)	平均気泡径 (mm)
600	Pasveer	20	2.4	300	3.30～5.23
1200	Beck	45	1.92～2.01	〃	3.08～5.37
	King	90	2.03～2.49		
1800	〃	90	2.19～2.46	〃	4.19～5.49
2400	〃	90	2.54～3.96	〃	4.74～6.38

本実験で求めた気泡径と空気吹込量との関係では式－(3)に示したように、Gの指数は過去の調査結果よりも小さくなっている。合田・宗宮は通気率1,000～1,200の散気盤による実験から、Gの指数として0.183を与え、これはKingによる指数0.2に近似したと述べている。[(9)] これに対して、著者らの実験から求めた通気率1,200の散気盤のGの指数は式－(3)より0.121となっている。気泡径と空気吹込量との関係においてGの指数が大であるということは空気吹込量が変化したときの気泡径の受ける影響が大きいということであり、これは水深の浅いエアレーションタンクなるが故の現象ということができるのではないだろうか。本実験で得られた結果では図－4に示したように気泡径は空気吹込量によって僅かな影響を受けているに過ぎない。すなわち、散気盤から発生する気泡径はほぼ一定に近いものであり、これは空気吹込量が増加した分だけ気泡数が増加することを意味している。

そのため、空気吹込量によって気泡径が大きく変化する水深の浅いエアレーションタンクでの実験の場合よりも空気吹込量の増減による K_La の影響は大きくなると考えられる。図－7ではその関係が明確に示されており、その直線の勾配は過去の実験で得られた同種類の関係を示した図の勾配よりもはるかに急である。

Eckenfelder式によれば、Gの指数 $(1-n)$ が1.0より大きいときは空気吹込量の増加にともなって気泡径は小さくなるはずであるが、筆者らの実験範囲では気泡径はほぼ一定と考えられるか、または極く僅かではあるが増え気味であった。しかし、式－(12)のようにGの指数 $(1-n)$ は1.0よりも大きいにもかかわらず、気泡の細分化は行なわれていないのは前述のとおりである。この理由についてはEckenfelder式がエアレーションタンク表面からの酸素の導入量を無視していること（空気量の増加とともに、この再ばっ気量の占める割合は増加する）。更に気泡をすべて球と仮定しているが、実際にはすべて楕円体であり、その偏平度は比較的大きいこと。などが考えられる。これらについては今後検討を加えていく予定である。

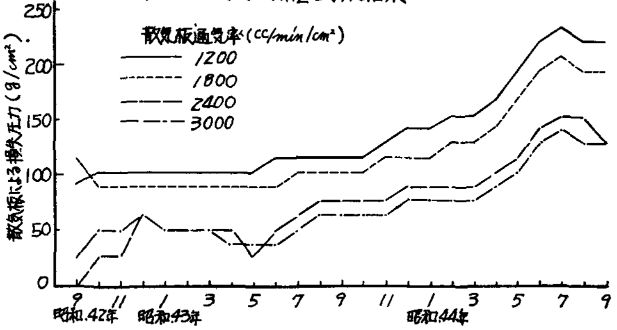
図－8は散気盤面積比5%と10%についての空気吹込量と K_La との関係を通気率1,800の散気盤について比較したものである。King式によれば散気盤面積比10%の場合は5%に比べて酸素吸

収量は8〜18％大きくなるが、図−8のように顕著な差異は認められなかった。

7. 散気盤閉塞試験

著者らは散気盤を用いた旋回流式エアレーションタンクの問題点の1つは散気盤の閉塞にあることから、実験に使用したと同一の通気率（ただし通気率600のかわりに3,000を用いた。）の散気盤を東京都落合下水処理場のエアレーションタンク内に設置して閉塞試験を実施してきた。現在まで2年間にわたって調査してきたが、図−9に示したように全体として閉塞の度合が進んでいるが、通気率の大小による閉塞の差異は今のところほとんど現れていない。

図−9　散気板の閉塞試験結果



散気盤の閉塞についてAndersonは (i)他の条件が同じであれば目ずまりが限度に達するまでの散気盤の寿命は稼動時間の長さよりも通過した空気総量によって決まること。(ii)散気盤の目ずまりの速さは通気率に反比例すること。[10]を報告している。著者らの実験は吹込空気量を一定として散気盤面の比較を行なっているものである。試験は今後も継続していく予定である。

8. まとめ

巾員5.6 m、有効水深3.5 m、散気盤上水深3.0 m、奥行2.0 mの実験用大型エアレーションタンクを用いて、エアレーションタンク内の酸素移動について実験を行なってきた。実験で用いた散気盤は通気率600, 1,200, 1,800, 2,400の4種類であり、散気盤面積比は10％を中心として5％についても一部行なった。実験結果を概括すると次のとおりである。

(1) Oldshueの式を用いてエアレーションタンク内の平均的な飽和溶存酸素濃度を求めることは実用上差支えない。

(2) Kingの式によって K_La を求める場合、溶存酸素不足量によってその値はかなり変化する。溶存酸素不足量比100％の場合にはKingの式による計算値と実測値がほぼ等しいものであったが、酸素不足量比50％の場合には計算値が実験値を上廻っており、実験値は計算値のほぼ75％であった。

(3) 本実験において求めた気泡径は散気盤上水深の上中下3点について測定したものを平均したものである。この値は過去の測定者（Pasveer、Beckなど）によって求められたものより、かなり大きなものとなった。しかし、空気吹込量に対する気泡径の変化は極く僅かであり、通気率600を除いてはほぼ一定とみても差支えない程度であった。

(4) 本実験で得られた総括酸素移動係数と空気吹込量との関係は過去における他の測定者によって得られた結果よりも変化の大きいものであった。この原因として考えられるのは他の測定者の実験が水深の浅いエアレーションタンクによって行なわれたものであり、本実験での条件と大巾に異なるためである。

(5) 本実験から得られた総括酸素移動係数に対する空気吹込み量の指数 (1−n) は 1.0 よりも大きなものとなった。この理由としては気泡径の大なること，空気吹込量に対する気泡径の大きさに変化が少なく，空気吹込量が多いほど気泡数が多くなるため と考えられる。

〔参考文献〕

1) H. R. King "Mechanics of Oxygen Absorption in Spiral Flow Aeration Tanks" Sew. & Ind. Wastes, Vol. 27, No. 8, p 894 : No. 9, p. 1007 : No. 10, p. 1123.

2) P. F. Morgan & J. K. Bewtra "Diffused Air Oxygen Transfer Efficiencies" Advances in Biological Waste Treatment, edited by W. W. Eckenfelder Jr. & B. J. McCabe, Pergamon Press Inc., p 181 (1963)

3) 柏谷衛，安中徳二，及川直也「エアレーションタンクの流速について」土木学会第23回年次学術講演会概要集，II−185，(1968)

4) 柏谷衛，安中徳二，及川直也「エアレーションタンク内の気泡の挙動について」土木学会第24回学術年次講演会概要集 II−148 (1969)

5) J. Y. Oldshue "Aeration of Biological Systems Using Mixing Impellers" Biological Treatment of Sewage & Industrial Wastes, Vol. 1, edited by B. J. McCabe & W. W. Eckenfelder Jr., Reinhold Publishing Co. p. 231 (1955)

6) D. J. O'Connor & W. W. Eckenfelder Jr. "Biological Waste Treatment" Pergamon Press Inc., p 86〜104. (1961)

7) A. Pasveer "Research on Activated Sludge — VII. Efficiency of the Diffused Air System" Sew. & Ind. Wastes, Vol. 28, No. 1, p. 28 (1956)

8) A. J. Beck "Diffuser Plate Studies" Sew. Works Journal, Vol. 8, No. 1, p. 22 (1936)

9) 合田健，宗宮功「エアレーションタンクにおける気泡の挙動と流動」土木学会論文集 第133号 (1965年1月)

10) N. E. Anderson "Tests and Studies of Air Diffusers for Activated Sludge" Sew. & Ind. Wastes, Vol. 22, No. 4, p. 461. (1950)