

K_{La}と端効果に関する二、三の考察

東北大学工学部 正会員 工博 松本順一郎

日本大学工学部 正会員 工修 ○ 中村玄正

1. はじめに

エアレーションにおける酸素の移動を考えると、実用的見地に立つ場合には、装置に直結した問題として、実際の規模もしくはパイロットプラント規模のエアレーション効率として取扱うことが有効な方法と考えられる。すなわち、Morgan¹⁾らは、エアレーションタンクの形状や、種々の散気装置による酸素吸収率を、実際規模のエアレーションタンクによって研究し、水理的せん断力による流の乱れと界面の種の増加の重要性を指摘している。また、King²⁾は多孔質散気装置を放回流式エアレーションタンクに取付けて実験を行ない、空気流量、気泡径、酸素不足量、水深さらに汚濁物質濃度との関係を報告している。これらの結果に対し、宗宮³⁾は、模型エアレーションタンクを使用した実験結果から、空気吹込量と流速、K_{La}、さらにスケールアップの問題にまで言及して、King²⁾やEckenfelder⁴⁾らが与えた式の是非を検討している。また、柏谷⁵⁾らは、容量40 m³の大型エアレーションタンクを用いて、空気吹込量、散気板通気率、槽内流速、K_{La}等の関係を求め、河川再曝気の考え方を導入するという新しい試みによって、酸素移動係数K_Lを求めている。梅本⁶⁾らは、曝気性能とK_{La}とを結びつけて、エアレーション効率を考えている。

一方、これら各種装置の間に内在する普遍性を追求し、エアレーションの問題を演繹し、より有効な予測を行なうためには、エアレーションという現象の根底を支配している酸素移動係数K_Lといわれるものを総括移動係数K_{La}から分離し、移動現象に関与する種々の因子を一つ、一つ解明していくことも必要にして、不可欠であろう。酸素移動係数K_Lへのアプローチの一つとして、前述の柏谷⁵⁾らの研究は、非常に興味深いものがある。また、Barnhart⁷⁾の研究は、Eckenfelderの考え方を導入して実験を行なっている。しかしながら、これらの研究においては、移動のパラメーターとしての移動界面は、多孔質散気装置よりランダムに発生される気泡群として捉えられ、気液接触界面は一つの集合体と考えられよう。

本報告は、気泡の大きさを支配する気泡発生孔と個々の気泡の性状、気液接触界面、酸素移動等の間の関連づけを求める方向で、単一孔より比較的静的に発生される気泡の場合について、

- i) 気泡が液中を上昇するときの酸素の移動
 - ii) 気泡が生成、消滅するときの酸素の移動と大気からの酸素の移動
- の2つを分離することを目的とした実験結果について報告するものである。

2. 実験装置および実験方法

実験装置 実験装置の概略を図-1に示す。本実験では、コラム壁が気泡の性状に影響を及ぼすことのないように、内径140 mmのパイレックスガラス製円筒を用いた。コラムの外側には、内法300 mm X 300 mm X 1300 mmの両面ガラス製角型水槽を設け、コラム内に存在する気泡を撮影する際

のレンズ効果による歪を最小限に抑え、また、コラム内の水温を一定に保つ恒温槽の役目も果している。

実験方法 まず、所定の空気流量が得られるようにニードルバルブを調整し、コラム内に市販の一回蒸留水を所定の水位まで注入する。ついで、チツリガスをコラム底のディフューザーから送ることによって、酸素の放散を行ない、容存酸素が1ppm以下になったところでチツリガスの送気を停止する。その後、単一孔から一定の速度で連続的に発生する気泡から水中に溶解する酸素の量を、溶存酸素計によって連続的に記録し、時間-濃度曲線から酸素吸収速度を求めた。また、コラム内に発生する気泡の形状、大きさ、上昇速度等は、カメラシャッターと連動する高速度マルチストロボを3,000rpmで2回または4回発光させて写真撮影を行ない、得られたフィルムをスクリーン上に投影して測定した。使用したオリフィスは、内径0.01cm, 0.02cm, 0.03cm, 0.06cm, 0.09cmのガラス製毛管である。

- A ロータリーコンプレッサー
- B 調圧室
- C ニードルバルブ
- D 浮遊式流量計
- E 水銀マンメーター
- F オリフィス
- G 外部水槽
- H コラム
- I フローフ
- J 溶存酸素計
- K 石鉄膜流量計
- L 記録計
- M 望遠レンズ付カメラ
- N マルチストロボ

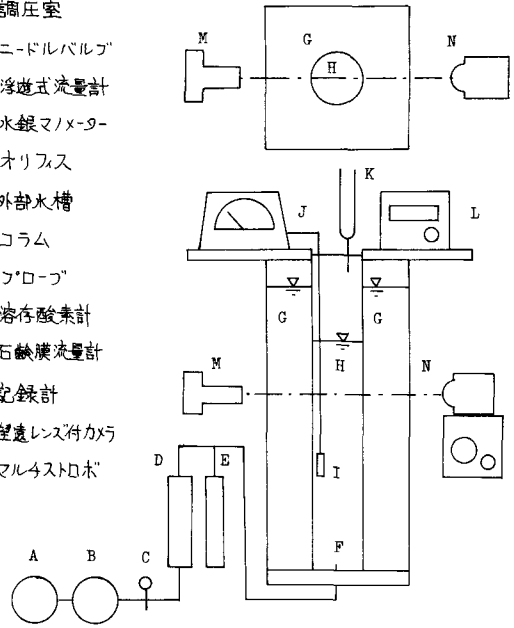


図-1 実験装置の概略

3. 実験結果と考察

気泡の形状、大きさ、分布 水中に存在する気泡は、その大きさにより、球形、回転楕円体、キノコ状の3種類の形状を呈する。これらの形状について尺木は、

球形気泡	$D/A \approx 1$	$Re \cdot M^{0.23} < 2$
楕円体気泡	$D/A = 1.14 (Re \cdot M^{0.23})^{-0.176}$	$2 < Re \cdot M^{0.23} < 6$
	$D/A = 1.36 (Re \cdot M^{0.23})^{-0.28}$	$6 < Re \cdot M^{0.23} < 16.5$
キノコ状気泡	$D/A = 0.62$	$16.5 < Re \cdot M^{0.23}$

のように分類し、また、Haberman⁹⁾らは Re 数のみによって次のように分けようとしている。

球形気泡	$Re < 400$
楕円体気泡	$400 < Re < 5000$
キノコ状気泡	$5000 < Re$

筆者らの実験した範囲内では、気泡の形状は楕円体であるとみなすことができた。したがって、気泡の体積および表面積は、より近似的に(1)式および(2)式で表わすことができよう。

$$V_b = \frac{\pi}{6} D_A^2 \cdot D_B = \frac{\pi}{6} D_b^3 \quad \text{----- (1)}$$

$$S_b = \frac{\pi D_A^2}{2} + \frac{\pi D_B^2}{4e} \ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) \quad \dots (2)$$

$$e = \left(\frac{A^2 - B^2}{A^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots (3)$$

実験した気泡を(1)式および(2)式により、体積と表面積を求め、球体相当直径(以下単に気泡径と呼ぶ)によって整理し、(4)式が得られている。(図-2)

$$S_b = 3.64 D_b^{2.12} \quad \dots (4)$$

これより、気泡を単に球と見なすと、その表面積に10%程度の違いが出るのがわかった。

空気流量が小さく、気泡がオリフィス孔において、表面張力と浮力との静的な均衡のもとに生成されるときには、次式が成立すると考えられる。

$$\frac{\pi}{6} D_b^3 \cdot \Delta \rho \cdot g = \pi d \sigma \quad \dots (5)$$

さらに変形して、無次元表示の(6)式となる。

$$\frac{D_b}{d} = 1.82 \left(\frac{\sigma}{\Delta \rho \cdot g \cdot d^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots (6)$$

van Kleevelene¹⁰⁾はガラス毛管で水中で実験を行ない、 $d=0.015 \sim 0.095 \text{ cm}$ の径の場合に $D_b/d = 0.246$ であったと報告し、一方、Benzing¹¹⁾は、 $d=0.2 \sim 0.48 \text{ cm}$ 径で D_b/d はオリフィス径に比例して変化することを見出し、実験式として(7)式を提案している。

$$\frac{D_b}{d} = 1.82 \left(\frac{\sigma}{\Delta \rho \cdot g \cdot d^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \dots (7)$$

図-3は、筆者らの実験によって得られた結果を、空気流量と気泡径の関係で示したものであり、明らかにオリフィス径による相違が見られる。さらに、図-4は、 D_b/d と $\sigma/\Delta \rho \cdot g \cdot d^2$ によって結果を整理し、(6)式と比較したものであり、実験式として(8)式が得られている。

$$\frac{D_b}{d} = 4.5 \left(\frac{\sigma}{\Delta \rho \cdot g \cdot d^2} \right) \quad \dots (8)$$

D_b/d が既往の実験値よりかなり大きい値を示

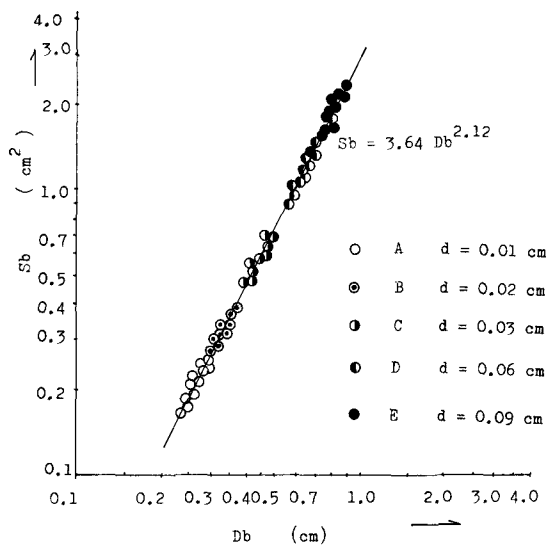


図-2 気泡径と気泡表面積

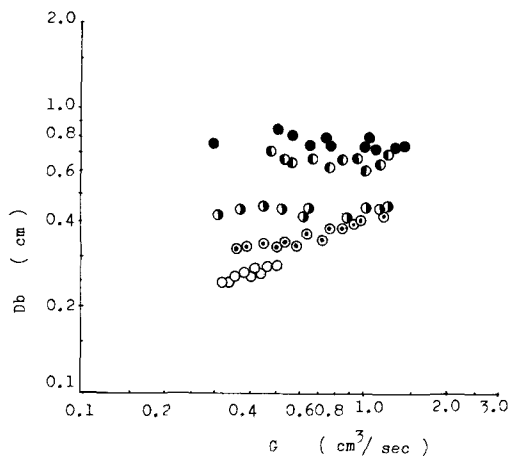


図-3 空気流量と気泡径

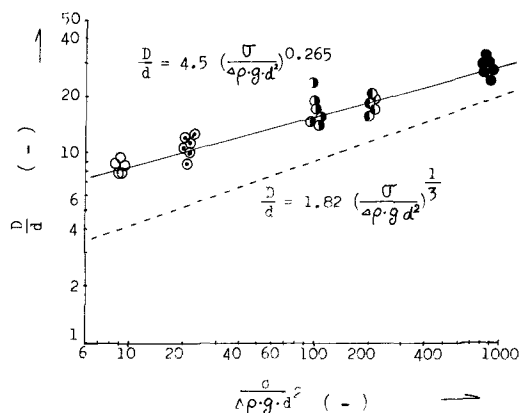


図-4 オリフィス径と気泡径

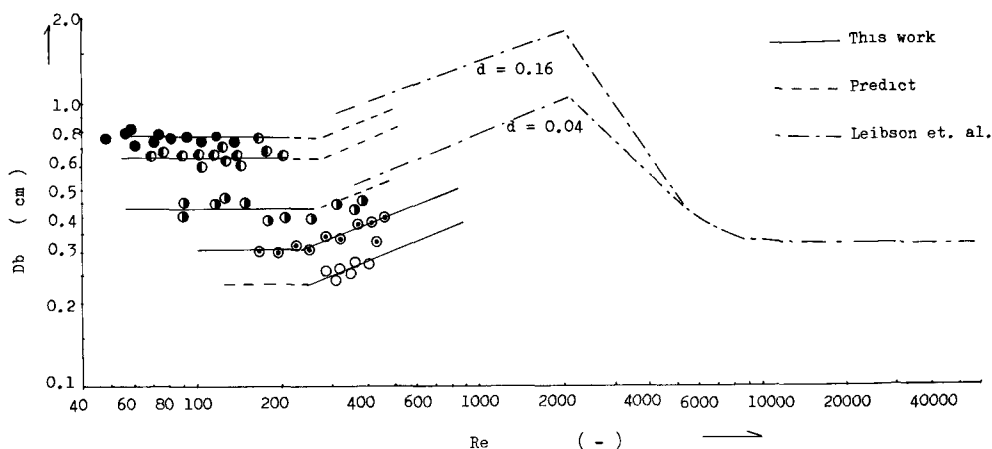


図-5 気泡径とレイノルズ数の関係

を示しているが、これはオリフィス上の水深の違いによるものと考えられる。すなわち、van Klevelen らは、水深 5 ~ 24 cm で実験を行っているため、気泡は比較的発生し易い。一方、筆者らは水深 40 ~ 95 cm で実験を行っているため、オリフィス内にある空気は、外圧に抗して発生するために相応の圧力を持たされるため、水面近くに至った気泡は前者の気泡より遙かに大きくなるのであろう。

次に、オリフィスを通ずる空気のレイノルズ数と気泡径との関係を図-5 に示す。本図における一点鎖線は、Leibson⁽¹²⁾ らの実験結果を示すものであり、鎖線は、筆者らの実験外の所を予想するものである。これより、気泡径に及ぼす空気流量の影響として、次の3つの範囲が存在すると考えられる。すなわち、

- i). $Re < 300$ 空気流量に関係せず、気泡径は一定である。
- ii). $300 < Re < 2,000$ 空気流量に比例して気泡径は大きくなる。
- iii). $4,000 \sim 6,000 < Re$ 空気流量に関係せず、気泡径は極端に小さくなる。

図-6 には、単一オリフィスより発生する気泡の分布状態の一例を柱状図にて示し、さらに

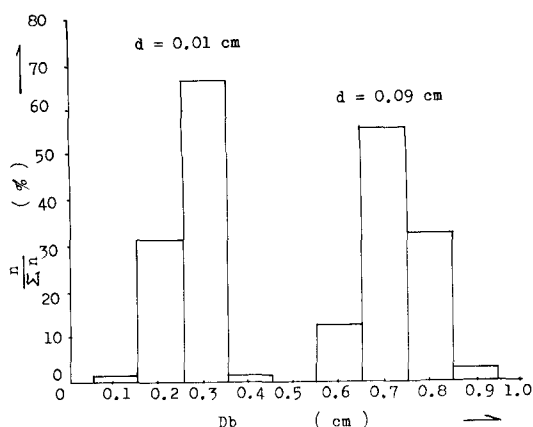


図-6 気泡径分布の柱状図

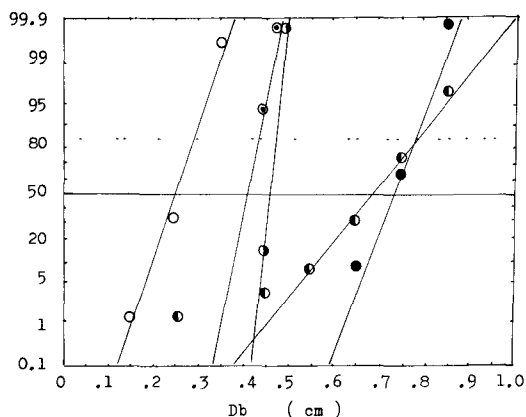


図-7 正規確率分布による表示

各オリフィス径の場合の例を正規確率分布紙にプロットして図-7が得られている。これまで、気泡の分布は、ほぼ対数正規分布として取り扱われていたという報告があるが、今回の実験では、正規分布でほぼ表わしうることがわかった。また、図-5のレイノルズ数が6000以上の場合では、微細気泡の発生が非常に多く、正規分布または対数正規分布のような形では表わし得ない相が存在するようである。

気泡の上昇速度 静止液体中を上昇する気泡の上昇速度については、これまでに多くの報告がある。^{8,14,15)} Haberman⁹⁾らは、気泡の上昇速度は気泡径による大きな相違があるとし、図-8のような結果を報告している。水の場合には、この他にも多くの報告がなされているが、測定者による多少の違いが見られ、また水中に存在する微量な汚染物質による影響も報告されている。^{9,14)}

一方、多数の気泡が群をなして上昇する場合について、平均気泡径とガスホールドアップの関係から、小出らは¹⁶⁾(9)式を報告している。すなわち、

$$\begin{aligned} d^2 g \rho / \sigma &< 8.0 \\ 0.240 &< 1 - \varphi < 1.0 \end{aligned}$$

に対して

$$\begin{aligned} \frac{U_s}{U_t} &= \left[1 + 0.0167 \left(\frac{d^2 g \rho}{\sigma} \right)^{2.16} \right] \\ &\times \{ 0.27 + 0.73 (1 - \varphi)^{2.80} \} \quad \text{--- (9)} \end{aligned}$$

(9)式によれば、 $\pm 20\%$ の誤差内で使用しうることが示されている。また、前述の柏谷⁵⁾は、散気板より気泡を発生させて、空気吹込量と気泡上昇速度、気泡相対速度の関係を示し、相対速度は、空気吹込量の増加に従って減少するという結果を述べている。

筆者らの実験においては、空気流量は極めて小さく、ホールドアップ法を用いることは無理なので、個々の気泡の上昇速度をストロボ発光-写真撮影法によって求めた。図-9は、コラム内を上昇する気泡のみかけ上昇速度の分布状態を正規確率分布紙上に表わしたものであり、プロットが直線上に

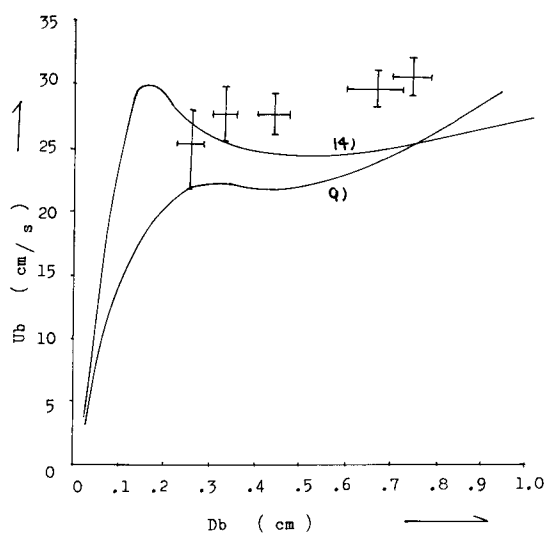


図-8 上昇速度の比較

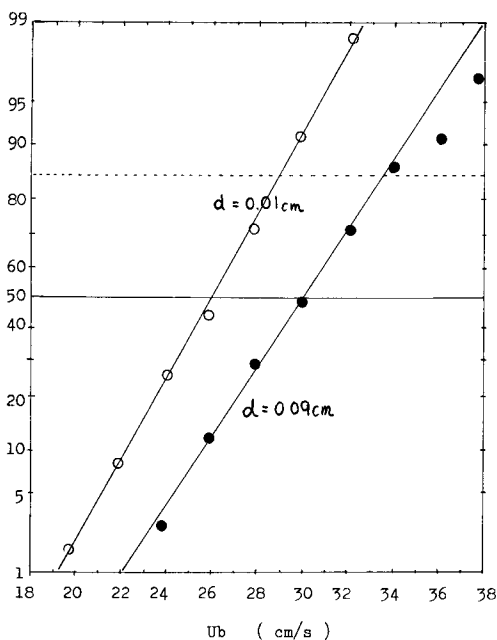


図-9 上昇速度の分布

よく配されていることから、正規分布によって十分表わし得ると考えることができよう。なお、図-9には、実験した気泡のみかけ上昇速度と、静止液体中を上昇する気泡の上昇速度とを比較した。コラム内を上昇する気泡は、静止液体中を上昇する場合と違って、気泡の浮上する水の流動や気泡相互の干渉によって、その形状や速度はかなり影響を受けると考えられたが、図-9のように比較のまとまった量として取扱うことができれば、気液界面面積の算出に際しての誤差を小さく抑えることができよう。

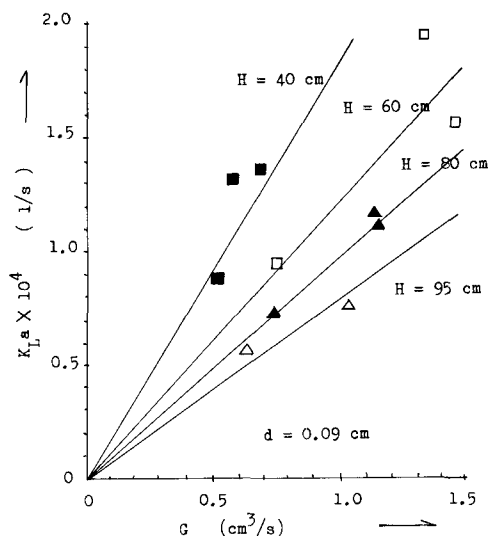


図-10 通気量と総括容量係数

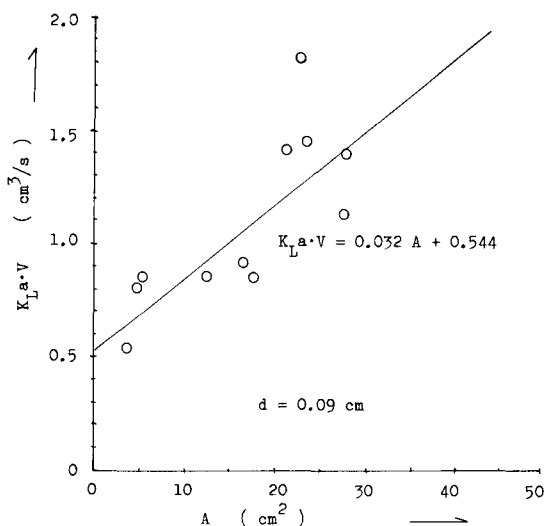


図-11 端効果の分離 (E)

酸素移動 総括酸素移動係数 $K_L a$ や酸素供給能に及ぼす散気装置の種類、エアレーションタンクの形状、空気流量等の影響については、これまでも多くの研究がなされている。また、総括酸素移動係数 $K_L a$ とオリフィス径、空気流量、気泡径等との関係については、筆者らの報告があるが、これらには、所謂端効果なるものが考慮されていない。

本実験では、コラム中の水への酸素の移動が、気泡の上昇時および端効果によって行なわれると考え、水深を変化させることによって、酸素移動係数 K_L の分離を試みた。

酸素のような難溶性がスの場合、移動速度抵抗は液境膜内にあると考えてよい。したがって、液の濃度の時間変化は(10)式で表わされ、さらに積分して(11)式を得る。

$$\frac{dc}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad \text{----- (10)}$$

$$K_L a = \frac{1}{t} \ln \frac{C_s}{C_s - C} \quad \text{----- (11)}$$

水深 H を、40 cm, 60 cm, 80 cm, 95 cm に変化させた場合の $K_L a$ の変化を図-10に示した。本図に示される空気流量の増加に伴う $K_L a$ の増加は当然の現象であるが、さらに水深による変化が明らかに表われている。ここで、端効果を考慮した場合、(10)式より(12)式が導かれる。

$$\frac{dc}{dt} = K_L a (C_s - C) = K_L \frac{A}{V} (C_s - C_b) + K_{LE} \frac{A^E}{V} (C_{SE} - C_E) \quad \text{--- (12)}$$

コラム内においては、酸素の濃度分布はなく均一濃度であり、酸素飽和濃度も気泡界面、コラム自由表面、コラム内液全体にわたって均一であると考えると(13)式が得られる。

$$K_L a \cdot V = K_L \cdot A + K_{LE} \cdot A_E \quad \text{--- (13)}$$

(13)式によって、各オリフィス径のデータを最小自乗法を用いて整理し、(14)-A~E式が得られた。

$$d = 0.01 \text{ cm}$$

$$K_L a \cdot V = 0.034 A + 0.389 \quad \text{--- (14-A)}$$

$$d = 0.02 \text{ cm}$$

$$K_L a \cdot V = 0.040 A + 0.107 \quad \text{--- (14-B)}$$

$$d = 0.03 \text{ cm}$$

$$K_L a \cdot V = 0.021 A + 0.659 \quad \text{--- (14-C)}$$

$$d = 0.06 \text{ cm}$$

$$K_L a \cdot V = 0.037 A + 0.355 \quad \text{--- (14-D)}$$

$$d = 0.09 \text{ cm}$$

$$K_L a \cdot V = 0.032 A + 0.544 \quad \text{--- (14-E)}$$

ここに、Aは気泡による気泡界面を積であり、次式によって与えられる。

$$A = \frac{G \cdot S_b \cdot H}{v_b \cdot U} \quad \text{--- (15)}$$

図-11はオリフィス径 $d = 0.09 \text{ cm}$ の場合の例を図示したものであり、図-12は気泡径による K_L の値を示したものである。さらに、他研究者^{7, 21, 22, 23)}のデータをプロットして比較している。これらの結果から、酸素移動速度係数 K_L は $0.02 \sim 0.04 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、端効果として考えられる $K_{LE} \cdot A_E$ は $0.1 \sim 0.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ の値が得られた。

4. おわりに

単一オリフィスより連続的に気泡を発生させて、気泡の性状、酸素移動速度係数および端効果等の考察と検討を行ない以上のような結果が得られた。しかしながら、水中を上昇する気泡は、界面の振動、ジグザグ運動、伸縮運動を伴うために、気泡界面積として S_b をとることにどの位の正確さがあるか、また、気泡の空に対する相対上昇速度をどのように捉えていくか、さらに、微量の汚染物質に直ちに影響されるといわれる気泡を介して、汚染系そのものであるエアレーションタンク内の現象に対して、どのようにアプローチしていくか等々残された問題は非常に多い。今後、空気流量が多いときの気泡の性状、相互干渉、移動現象等についても研究を進めていきたい。

なお、本研究を進めるにあたって、仙台市役所 菅田秀徳氏、東北大学学生 小松誠之助氏の御協力を得ました。ここに謝意を表します。

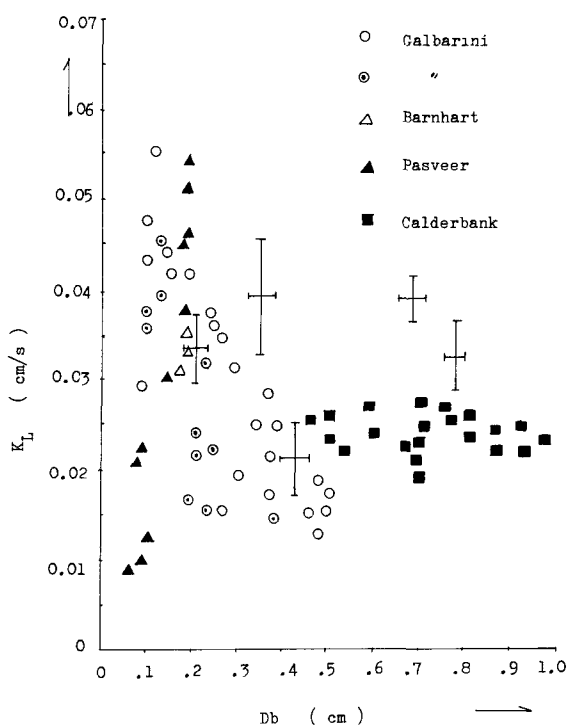


図-12 酸素移動係数と気泡径

5. 参考文献

- 1) Morgan, P.F., Bewtra, J.K.; Air diffuser efficiencies; W.P.C.F. Vol. 32 p. 1047 (1960)
- 2) King, H.R.; Mechanics of oxygen absorption in spiral flow aeration tanks, S.I.W. Vol. 27. p. 894, Vol. 27 p. 1007 (1955)
- 3) 京宮功; 活性汚泥の操作因子に関する基礎的研究, 京都大学学位論文 (1963)
- 4) Eckenfelder, W.W.; Absorption of oxygen from air bubbles in water, A.S.C.E. Vol. 85 p. 89 (1959)
- 5) 柏谷衛, 安中徳二, 及川直也; 散気式エアレーションタンクの酸素移動 (第2報), 第7回衛生工学研究討論会講演論文集 p. 91 (1971)
- 6) 橋本奨 他; 気泡曝気の曝気性能とその経済性に関する研究, 水処理技術 Vol. 12 p. 17 (1971)
- 7) Barnhart E.L.; Transfer of oxygen in aqueous solutions, A.S.C.E. SA3 p. 645 Vol. 95 (1969)
- 8) 只木横力他; 種々の静止液体中を上昇する単一気泡の形状および上昇速度について, 化工, Vol. 25 p. 254 (1961)
- 9) Haberman et al; An experimental study of bubbles moving in Liquids, Tr. A.S.C.E. Vol. 121 p. 227 (1956)
- 10) van Klevelen et al; Studies of gas-bubble formation, Chem. Eng. Sci. Vol. 46 p. 29 (1950)
- 11) Benzing et al; Low frequency bubble formation at Horizontal circular orifices, Ind. Eng. Chem. Vol. 47 p. 2087 (1955)
- 12) Leibson et al; Rate of flow and mechanics of bubble formation from single submerged orifices, A. I. Ch. E. Vol. 2 p. 296 (1956)
- 13) 只木横力他; 単一オリフスより生じる気泡の大きさについて, 化工 Vol. 24 p. 603 (1960)
- 14) 久保田誠他; 低粘度液中における単一気泡の挙動について, 化工 Vol. 31 p. 1074 (1967)
- 15) 宮城音五郎; The motion of an air bubble rising in water, 日本機械学会誌 Vol. 28 p. 97 (1925)
- 16) 小出耕三他; 気泡群の平均気泡径, 上昇速度, ガスホールドアップ, 化工, Vol. 30 p. 712 (1966)
- 17) Cleasby et al; Oxygenation Efficiency of a bladed rotor, W.P.C.F. Vol. 40 p. 412 (1968)
- 18) Pasveer et al; A new development in diffused aeration, W. P. C. F. Vol. 37. p. 1267 (1965)
- 19) 松本順一郎他; 種々の大きさのオリフスから発生する気泡の性状と酸素吸収について, 第25回土木学会年次学術講演会別冊, p. 427. (1970)
- 20) 松本・中村; 単一オリフスより生じる気泡の性状と酸素移動に関する一考察, 土木学会論文報告集 Vol. 175 p. 49 (1970)
- 21) Galbarini et al.; Mass Transfer from single gas bubble, Canad. J. Chem. Eng. Vol. 47 p. 35 (1969)
- 22) Calderbank et al; Mass transfer in the continuous phase around axisymmetric bodies of revolution, Chem. Eng. Sci. Vol. 19. p. 471. (1964)
- 23) Pasveer, A; Research on activated sludge, Sewage and Ind. Wastes. Vol. 27. p. 1120 (1955)