

V-35 エアレーションの基礎的研究

京都大学工学部 正員 工博 合田 健

これは筆者が昭和34年9月から同35年8月まで *New York University* の *Prof. Dolbins* と協力して行なった研究の成果であり、そのごく概略は昭和35年11月13日大阪における土木学会関西支部年次学術講演会で述べた。

この研究は上下水の処理や水流の自浄作用に関連の深いエアレーションに関して、現象の解明や装置の合理的設計の基礎になる大気中酸素の溶液中への移行、とくに溶液が攪乱され、あるいは水流が乱流状態にあるときの総合ガス伝達係数 K_L がいかなる法則に支配されるかを検討したものである。このテーマについてはすでに *Lewis and Whitman* (*Ind. Eng. Chem.*, 16, 1215 (1924)), *Haney* (*Jour. AWWA*, 46, 353 (1954)), *Higbie* (*Trans. Amer. Inst. Chem. Eng.*, 31, 365 (1935)), *Stefan* (*Wiener Sitz.*, 77, 371 (1878); 99, 161 (1879)), *Pasveer* (*Sew. Ind. Wastes*, 25, 1253 (1953)), *Dankwerts* (*Ind. Eng. Chem.*, 43, 1460 (1951)), *Kishinevski and Serebransky* (*J. App. Chem. of USSR*, 29, 29 (1956)), *Michalova and Kishinevski* (*J. App. Chem. of USSR*, 31, 1007 (1958)), らの研究があり、 K_L の算定に関する諸種の公式が発表されているが、これらが、われわれの当面するような混合の場合、つまり曝気槽とか自然水流などの場合に適合するかどうかがよく確かめられていなかった。ことに、上述のうち化学工学方面の論議の対象では往々にしてわれわれの対象としてゐるものとは異なったスケールの攪乱が扱われるので、たとえば *Dankwerts* が *Higbie* と同様な立場から導びき出した公式

$$K_L = \sqrt{DS} \quad \text{----- (1)}$$

は、拡散係数 D とともに、 S という混合場にある流体 fraction の鉛直方向の移動頻度をあらわす要素が導入された簡単な法則であるが、これが比較的弱い、鉛直混合の周期の小さい領域で現象に適合するかどうか疑問の点があった。そこで、1959.7 ~ 1960.8 月の間はほとんどこれに対する実験的検討に費した。

本研究の基礎になっている理論は *Dolbins: Biol. Treat. of Sewage and Industrial Waste I Part 2-1 N.Y. (1956)* および *O'Conner and Dolbins. Trans. ASCE. 123, 661. (1958)* である。この理論は一般 *film theory* を基礎にしているが、酸素伝達の行なわれる間たえず *film* が一定の頻度で更新されている状態では、まず酸素伝達率の基本式は

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{----- (2)}$$

である。ただし、 m は伝達される物質の mass をあらわし、 $\frac{\partial m}{\partial t}$ はこの mass の transfer rate で、 D は diffusion coefficient, c は濃度、 x は移動の起る方向である。*Dankwerts* の idea により更新されつつある *film* の age の分布函数 $\phi(t)$ を考え、

$$\int_0^{\infty} \phi(t) dt = 1, \quad \text{および} \quad \phi(t)_{t=0} = S,$$

ただし、 Sdt は dt 時間中に replace される surface area の割合とすると、

$$\phi(t) = Se^{-St} \quad \text{----- (3)}$$

で、これによって age が t である *film* の任意部分を通して x 方向に伝達される量は、

$$-D\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0} \psi(t) dt = -DS e^{-st} \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0} dt$$

であるから、filmの単位面積を通して伝達される gas の total rate は

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -DS \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0} e^{-st} dt = -DS \left[\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}\right]_{x=0}$$

で $\bar{c}$ は c の Laplace transform である。 $0 < x < L$ 、 $t=0$ で $c = C_L$ 、 $x=0$ 、 $t>0$ で $c = C_i$ 、 $x = L$ 、 $t>0$ で $c = C_L$ の条件により結局

$$\frac{\partial m}{\partial t} = (C_i - C_L) \sqrt{DS} \coth \left(\sqrt{\frac{SL^2}{D}} \right) \text{----- (4)}$$

となり、厚さ L の film を通じて turbulence のない、steady の状態でのガス伝達率

$$\frac{dm}{dt} = K_L A (C_i - C_L) \text{----- (5)}$$

と比べて、 K_L は

$$K_L = \sqrt{DS} \coth \left(\sqrt{\frac{SL^2}{D}} \right) \text{----- (6)}$$

であらわされる。従って $S \rightarrow 0$ で K_L は 0 とはならず K_L に近づくはずである。また、上式の計算結果では、 $(\sqrt{SL^2/D})$ の値が 3.0 より大になると $\coth$ の項がほとんど影響しなくなり (1) とかわらない。つまり $0 \leq (\sqrt{SL^2/D})^{1/2} \leq 3$ の間は遷移領域であることが示される。

これに対する実験検証の装置としては一定容量のシリンダー中に蒸留水とガスを満たし、縦混合によるガスの吸収を物理的に測定するため、シリンダー内の刻々の圧力減少の補償には、圧力伝達系に電磁弁、リレーを通して *equivalent* のガス飽和水を補償する方式をとった。この方式は溶存ガス濃度を化学分析する方法に比し、サンプル採取による試料水の減少や低濃度測定のための分析誤差などの心配が全くなく全吸収過程を通じて等精度で正しく補償水量を読むことができる。数ヶ月を予備実験と装置の改良とに費やしたのち、最終的に図のような装置を造って縦混合にともなうガス吸収実験を行ない、ミキサのシリンダー水面に対する相対的位置を変え、またガスの種類、混合周期を変えて毎回ガス吸収量—時間曲線を求め、それをもとにして 10 実験により K_L の値を計算したわけである。

実験に際しては純度が高く、化学的变化による実験誤差の入る心配のない N_2 、 He 、 C_3H_8 (propane) および O_2 を用い、その湿度を一定に保ち、あらかじめシリンダー内に満たして置いて、これを Boiling の状態にあるガスフリーの蒸留水と入れかえ、冷却および加熱系により $20^\circ C$ とした後、シリンダー水の容量の約 $1/4$ (一定量) を上記ガスと置換し、同じく連絡管系にガスを満たす。駆動モーターの起動により *reciprocal* 式のミキサーが起動を始め、ガス吸収が開始されると連絡管系内の圧力低下により U 字管右側の電極持突が外れてリレーが働き、電磁弁が開いてビュレットから小量 (1 回の *click* に $1/10 \sim 1/20$ ml) のガス飽和水をマンメーターに注加し弁は閉じる。吸収の盛んな時はこれが頻繁であるが、ビュレット水面の低下率は電接時計により正確に記録できる。全吸収能の約 80~85% を吸収すると飽和水の添加率は極めて *slow* になり、それ以後のデータは必要ない。この間系内の温

度は終始厳密に 20°C に、また湿度も一定に保たれる。

実験にはかなりの時間を要し、そう多くのデータをとる事はできなかったが、1960年7月までにえられた成果では、シリンダー内水面に対するミキサーの2つの相対位置に対し、攪拌頻度 $20\sim 300\text{rpm}$ の条件において、 N_2 , He およびプロパンガスに関する over-all の伝達係数 K_L の示す傾向は、われわれの予想したものとはほぼ一致し、低頻度の *mixing range* において Dankwerts の(1)式は成立せず、極限值は ∞ に極めて近いことが証明された。

ガス吸収率測定装置

