

気泡混入による移動係数の増進

宮下 尚・菅田益司・喜多和彦

Improvement of Transfer Coefficient Using Gas Bubble Intermixture

Hisashi MIYASHITA・Masuji SUGATA・Kazuhiko KITA

The objective of this paper is to determine the local and mean mass transfer coefficients between solid wall and liquid layer of bubble phase, and the "gas hold up" in gas bubble column, and then to discuss the application to the heat transfer equipment on the basis of those experimental results. In the experiment the distributions of local mass transfer coefficient as well as the mean mass transfer coefficient were measured by an electrochemical method under the diffusion control.

Results 1. Mean mass transfer coefficient without gas bubble rate u_g increases exponentially and is proportional to $u_l^{0.6}$, as the liquid flow rate u_l increases ($0.4 < u_l < 20$ (cm/sec)). The coefficient with gas bubble is almost constant and agrees with the former in the range of $10 < u_l < 20$. 2. As the gas bubble rate u_g decreases ($u_g < 20$ (cm/sec)), the improvement ratio k_L / k_{L0} increases. In $u_l = 0.4$, it is recognized that maximum ratio amounts to sixteen. 3. "Gas hold up" ϕ and k_L / k_{L0} were correlated by following equation.

$$\frac{k_L}{k_{L0}} = 2.15 \phi^{0.2} \left(\frac{u_g}{u_l} \right)^{0.5}$$

1. 緒言

液中に気泡を分散させる気泡塔は、気・液接触装置として古くから使用され、熱的には潜熱移動および攪拌効果が加味されることから、最近では高温高熱流束をもつ原子炉の二次的冷却方法、つまり環境保全の立場から温排水の冷却法の一つとして注目され始めその研究が盛んになってきた。

気・液二相流動の様式のうち、気泡流動、気栓流動は物質移動操作および反応操作に利用されてきたが、気泡塔において気泡混入による液攪拌効果のため泡沫層をなす液と壁、および層中に置かれた物体との間の移動係数が大きくなることから伝熱装置としての利用が考えられるようになってきた。そこで

本研究の目的は気泡塔の伝熱装置への応用であり、このことにより伝熱係数の増大による装置のコンパクト化、また冷却水不足の緩和に広くその利用が注目されると思われる。

気泡塔の伝熱に関する従来の研究には次のような報告がある。Fair, J. R.¹⁾ および Kölbl, H.²⁾ らは、塔内に垂直に円筒形発熱体を置きその表面からの伝熱について報告し、吉留ら³⁾ や O. Smigelishi⁴⁾ も同じような方法で発熱体の形および多孔板の種類を変えて、水-空気系について実験を行ない、それらの影響について報告している。Ruckenstein⁵⁾ らは塔壁の伝熱面と気泡を吹き込むノズルの間隔を変化させて伝熱係数を測定し、伝熱面近傍からのみ気泡が吹き

込まれた場合に最も大きな値を示すことを明らかにしている。また、水科、宮下⁶⁾は、気泡塔内の発熱体の代わりに管群をを設置し、冷却装置として考え気泡を含んだ泡沫層と壁面との間の伝熱係数を求め相関した。

本研究では、従来の熱電対による伝熱係数測定では局所値を求めることが容易でないため、壁にうめ込んだ電極面における電極反応を利用する電気化学的方法を用いた。

液流量および空気流量をいろいろ変化させて気泡塔壁面の平均物質移動係数および局所物質移動係数を測定し、後者については多孔板からの高さ方向への変化を調べ気泡混入時における安定性のある流動状態になるまでの助走距離についても調べた。

また、気泡塔内のガスホールドアップも測定し、各流動状態を加味して物質移動係数との相関関係を求めた。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を図1-aに示す。

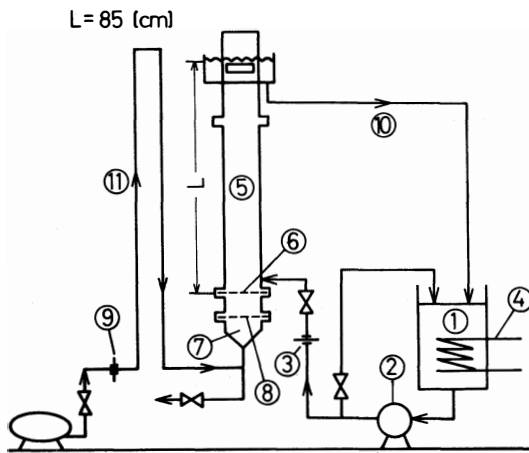


図1-a 実験装置概略図

気泡塔の断面は 3.0[cm]×10[cm]の長方形ダクト⑤で、多孔板⑥からの有効高さがL=85[cm]の透明な硬質塩化ビニル製の塔である。使用流体は空気および 2N-NaOH 水溶液で、水溶液中にはフェロシアン化カリウムとフェリシアン化カリウムがともに

0.005[g-mol/l]ずつ加えられている。

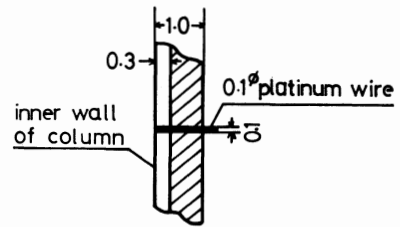
その正確な濃度は実験中サンプリングした後、ヨードメトリ法によって得られる。

NaOH水溶液は純水45[l]を用いて2Nに調製し、液供給タンク①で30[℃]に温度調節されケミカルポンプ②で循環使用する。空気⑪および液⑩は並流で、その流量はあらかじめ検定されたオリフィス計⑨、③で測定する。ガス分散板として、直径0.7[mmφ]、孔数37[個]の正三角形配置(ピッチ8[mm])されたステンレス製多孔板⑥が水平に置かれている。また、吹き込まれる空気を均一に分散させるため、樹脂製充填物よりなる整流部⑦と整流板⑧が設置されている。

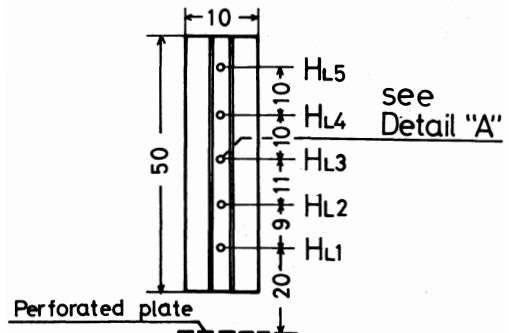
実験に際しては、支持電解質はNaOHで水溶液中に溶存しているフェロシアンイオン、フェリシアンイオンの酸化・環系系の電極反応を利用して陰極における限界電流*i*を測定するもので、測定した*i*と物質移動係数 k_L との間には次のような関係がある。

$$i / n_e F A = k_L (c_b - c_i) \quad (1)$$

c_b および c_i はそれぞれ溶液本体および電極表面にお



Detail "A"



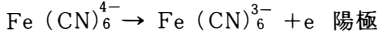
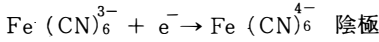
Location of setting platinum cathode

図1-b 電極部詳細図

ける濃度を表わしている。拡散律速の条件下では、 $c_i = 0$ と考えることができ、したがって次のようになる。

$$i / n_e F A = k_L c_b \quad (2)$$

フェロシアンイオン、フェリシアンイオンの酸化・還元系の電極反応は



になる。これより $n_e = 1$ となり、限界電流 i を測定すれば次式より k_L を求めることができる。

$$k_L = i / F A c_b \quad (3)$$

平均物質移動係数の測定に際しては、1.0 [cm] × 50 [cm] の測定用陰極を使用し、局所物質移動係数の測定に際しては壁にうめ込まれた直径 0.1 [cm] の白金電極を使用する。付加電圧として、平均物質移動係数および局所物質移動係数の測定いずれに対しても限界電流のあらわれている陰極電位 1.0 [V] を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 気泡混入による流路内移動係数の影響

実測の物質移動係数 k_L と液流速 u の関係を気泡混入の影響を知るために u_g をパラメータとして表わすと図2のようになる。

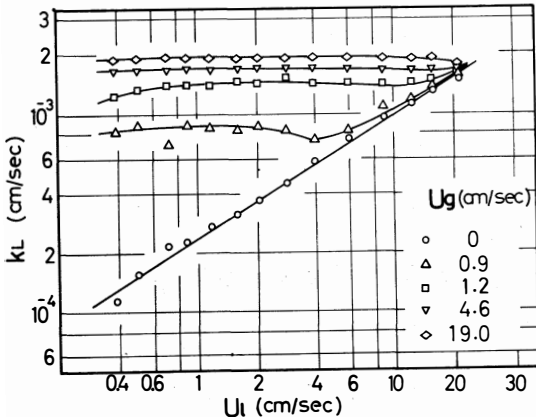


図2 気泡混入による移動係数への影響

図中○印は気泡を混入しない場合の移動係数（この場合 k_{L0} とする）であり、 u に対して直線を示し u のほぼ0.6乗に比例する。

このことは、伝熱係数が液流速に対して乱流域で $2/3$ 乗に比例するという既往の報告とほぼ一致し

ている。

また気泡を混入した場合、全体として k_L は u に対して無関係でほぼ直線になっている。これは、液流による攪乱よりも気泡混入による液攪乱の影響が k_L に対して支配的であることを示している。

液流量をさらに増大させると、 k_{L0} は $u_g = 0$ の場合の k_{L0} の直線に合流する傾向を示す。これは気泡混入による影響が薄らぎ、液流そのものによる対流による影響が支配的で、しだいに気泡混入の有無が k_L には関係しなくなるためである。また u_g は k_{L0} に接近する前で極小値を示しているが、 u_g の小なる独立気泡上昇の状態では液の攪乱が不安定なため k_L の変動も大きい、最も顕著に極小値が現われ、 u_g の増大とともに薄らいでいく。すなわち、この流動領域は気泡流動から気栓流動への遷移域にあたり、 u_g が大きい場合には u に関係なく気泡流動から気栓流動への変化が明瞭でなくなるためである。

図3は気泡を混入しない場合に対する気泡を混入した場合の物質移動係数比 k_L / k_{L0} を表わしている。

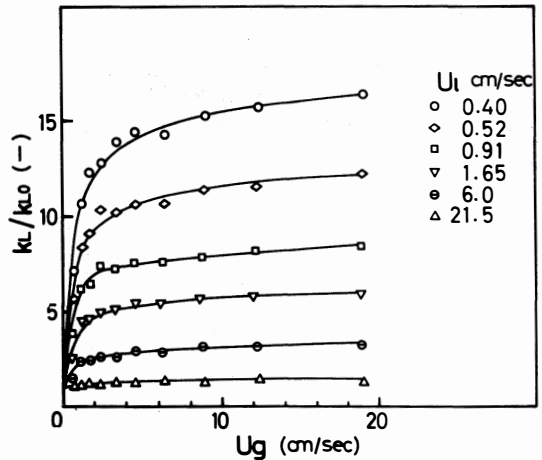


図3 平均物質移動係数比 k_L / k_{L0}

u 、 u_g を種々変化させることによって移動係数を16倍までに増大させることができる。増加比は、 u_g が小さいほど大になるのは図2の説明からもわかる。16倍という値は伝熱係数が気泡のない静止液に比べて気泡のある場合、6~10倍に増大するという既往の報告より大きいようであるが、気泡塔の伝熱装置や他の工業装置への有用性が認められる。

3・2 物質移動係数比とガスホールドアップの相関

図2からわかるように、液流速の小さい範囲では気泡混入の影響が支配的になり k_L は液流速に依存しなくなる。これは、電極近傍において気泡の液に対する相対速度（本研究の場合15~50 [cm/sec]）が u に比して大きいため、気泡が液の流動状態に対して支配的な役割を果すことを示す。したがって、気泡の電極近傍での流動に対する影響の大きさは、気泡の液に対する相対速度と液流速の比 (u_s / u_l) および気泡の頻度を表わすガスホールドアップ ψ により決定されることが予想される。ここで、気泡の液に対する相対速度を次のように定義する。

$$u_s = (\text{気泡の上昇速度}) - (\text{液上昇速度})$$

$$= \frac{u_g}{\psi} - \frac{u_l}{1 - \psi} \quad (4)$$

気泡流動状態における移動係数比とガスホールドアップ、相対速度比を相関すると図4のようにになり次の実験式を得た。

$$k_L / k_{L0} = 2.15 \psi^{0.2} (u_s / u_l)^{0.5} \quad (5)$$

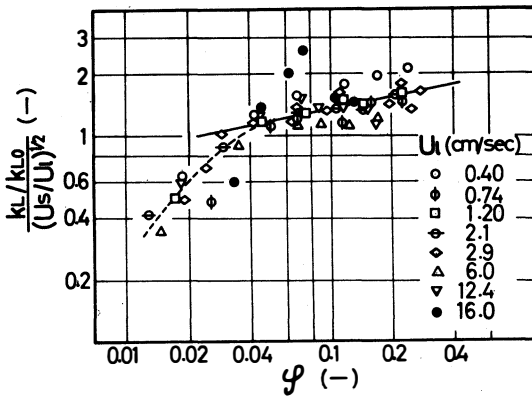


図4 気泡流動における k_L / k_{L0} と ψ の関係

3・3 局所物質移動係数の高さ方向の分布

塔壁に埋め込まれた点電極 (H_{L1} (20cm)、 H_{L2} (29cm)、 H_{L3} (40cm)、 H_{L4} (50cm)、 H_{L5} (60cm) の位置にうめ込まれている) を用いて局所物質移動係数を測定した。高さ方向の k_L の分布を知るために、液流速 $u = 1.2$ [cm/sec] の場合の u_g と k_L の関係を図5に示す。全般的に H_{L1} では高く、 H_{L3} で低くなり、 H_{L4} 、 H_{L5} で徐々に高くなっている。

このことより H_{L4} 、 H_{L5} の位置で流れが安定な状態になり、 k_L が一定となる区間に入るようである。

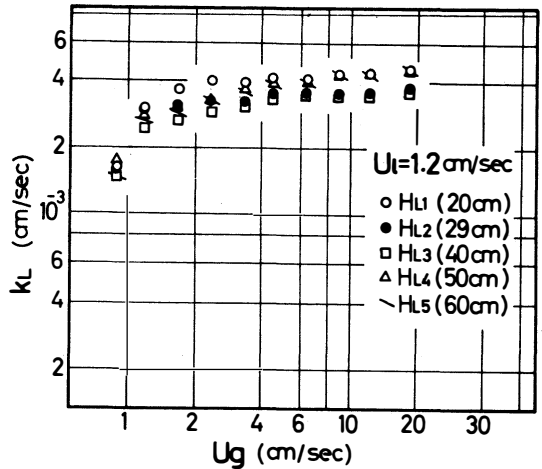


図5 局所物質移動係数の高さ方向分布

すなわち、多孔板から30~40 [cm] ぐらいの所から気泡混入流れが定常になるものと考えられ、このことから助走距離が30~40 [cm] になるものと思われ、気泡塔の相当直径 (4.62 [cm]) との比が約7~8であることも示唆できる。

また、気泡のない液流れのみの場合の局所物質移動係数 k_L は u の変化にかかわらず多孔板からの高さ方向に対して徐々に減少する傾向が見られるが、気泡を混入すると一般的に液流れのみの場合の流動状態とくらべ高さ方向に規則性が見られないという例を、 $u_g = 4.6$ [cm/sec] の場合について図6に示した。

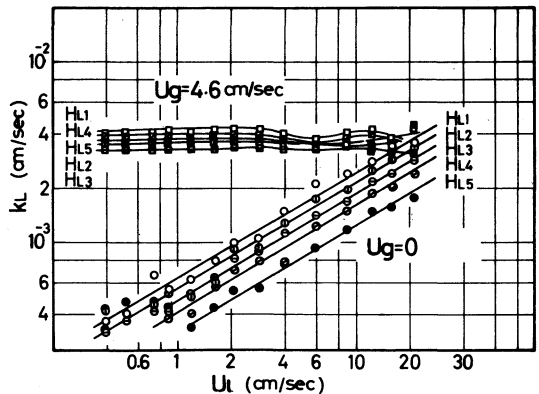


図6 気泡混入による影響

気泡混入による移動係数の増進

気泡混入の場合は、空気、液流速とも高さ方向にほとんど無関係となり、 H_{L4} 、 H_{L5} 付近で定常状態へ移行することを考慮すると、入口部での気泡攪乱の影響がかなり現われ、流動状態に変化を生じさせていると思われる。

4. 結 言

気泡混入時の移動係数比 k_L/k_{LO} が空気流量の変化で16倍まで増大させることが可能であり、気泡塔の伝熱装置や他の化学工業装置としての有用性が認められ、またガスホールドアップとの相関により実験式を得た。

移動係数の高さ方向の分布は、気泡混入のない場合高さ方向に関係があるが、気泡混入のある場合、空気、液流速とも高さ方向にほとんど無関係となつて k_L はほぼ一定となる。概略ではあるが、空気・液入口部での気泡攪乱の影響により定常流動になるまでの助走距離と相当直径との比が約7~8という値で示され、気泡塔の装置設計のための一指針を得られたと思われる。

使用記号

A	: 電極表面積	[cm^2]
c_b	: 液本体濃度	[$\text{g-mole}/\text{cm}^3$]
c_i	: 電極表面における濃度	[$\text{g-mole}/\text{cm}^3$]
F	: ファラデー定数	$= 9.650 \times 10^4$ [$\text{coul.}/\text{g-equiv.}$]
i	: 限界電流	[A]
k_L	: 物質移動係数	[cm/sec]
k_{LO}	: 液のみ流した場合の物質移動係数	[cm/sec]
n_e	: イオン電荷数	[g-equiv.]
u_g	: 空気の空塔速度	[cm/sec]
u_l	: 液流速	[cm/sec]
u_s	: 気泡の液に対する相対速度	[cm/sec]
ψ	: ガスホールドアップ	[—]

参考文献

- 1) Fair, J.R., Lambright, A.J. and Andersen, J.W. :
Ind. Eng. Chem. Process Design and Development
1, 33 (1962)
- 2) Kölbl, H., Siemes, W., Mass, R. and Müller, K. : Chem.

Ing. Techn. 30, 400 (1958)

3) 吉留他5名 : 化学工学, 29, 19 (1965)

4) 5) Ruckenstein, E. and Smigelishi, O. : Trans.
Instn. Chem. Eng., 43, T334 (1965)

6) 水科篤郎、宮下尚 : 化学工学, 32, 987 (1968)

7) W.H. McAdams : "Heat Transmission," McGraw-Hill
Book Co. (1954)

8) 小出耕造、久保田宏 : 化学工学, 30, 9, (1966)

9) 前田四郎 : 最近の化学工学, 16, (1963)

10) 加藤康夫 : 化学工学, 26, 1068, (1962)

11) T.M. IZUSHINA : Advances In Heat Transfer vol. 7
(1971)

12) 桐柴、岡崎、古田 : 化工協会第7回秋季大会
講演要旨集, 195, C201 (1973)

【化学工学秋期大会(九州大学、昭和50年10月)にて講演】