ラシヒリング塔における液側物質移動係数*

恩 田 格三郎**・佐 田 栄 三**・大 坪 藤 夫**

§1. 緒 言

充填塔における液側物質移動係数は充填高さの計算にまた化学反応を伴う吸収の解明の基礎となるものであるが、T. K. Sherwood & F. A. L. Holloway¹¹⁾が有名な液基準の容量係数に対する実験式を導いて以来、漸く関心を惹くに至ったものであり、この液側物質移動係数とその操作条件ならびに扱う物質系に関する無次元項で纏めようとする研究も、下記のごとく数種を数えるに過ぎない。すなわち G. Kling⁶⁾は

$$(k_L D_i / D_L) = 4.85 (Re^{0.703} - 0.885) Sc^{1/3}$$

なる式を与えているが、これは J. E. Vivian & R. P. Whitney¹⁷⁾が $k_L a$ は塔径に無関係であると述べている実験結果に反する纏め方であり、事実その結果も纏まったとは到底言い得ない程度のものである。

D. W. van Krevelen & P. J. Hoftijzer¹⁵⁾¹⁶⁾は

$$k_L (\mu^2 / \rho^2 g)^{1/3} / D_L = 0.015 (L / a \mu)^{2/3} (\mu / \rho D_L)^{1/3}$$

ただし $\ln[(a_i - a)/a] = -cL/\rho$

なる纏め方を発表し、 $k_L (\mu^2 / \rho^2 g)^{1/3} / D_L$ なる項を変型 Sherwood 数と命名しているが、このような a を用いて計算した場合、誤差の著しいことは Sherwood¹³⁾ 自身が指摘している。

W. M. Ramm¹⁰⁾は

$$Nu' = 0.02 Re^{0.67} Sc^{0.33} Ga^{0.33} (D_p / z)^{0.33}$$

なる纏め方を発表しているが、これは Krevelen の式の左辺の Galilei 数を右辺にもって来たものに過ぎない。最後の高さに関する項は Krevelen も、その原報⁶⁾においてやはり同様な項を付け加えている。

H. L. Shulman ら¹⁴⁾は

$$k_L D_p / D_L = 25.1 (D_p / L / \mu)^{0.45} (\mu / \rho D_L)^{0.5}$$

なる式を発表し、 D_p は充填物 1 個の全表面積と同じ表面積を持つ球の直径と定義しているが、これは実質的には充填物の代表長さ D_p と置いても同じことであり、変型 Nusselt 数 $k_L l / D_L$ 中の l に充填物の代表長さを単に置いたのでは、うまく纏まらないことは周知の事実である***。

われわれは二、三のラシヒリング塔充填物の充填塔内で物理吸収を行わせしめ、この結果およびこれまでに報告さ

れた物理吸収のデータとを比較検討し、液側物質移動係数を新しい考え方の下に纏めることを試み、これらのデータのすべてを一つの無次元式に纏め得た。

§2. 実験装置および操作

従来の文献^{1,5,11,16)}を検討するに充填物が 1/2" 以下のもののデータはほとんどなく、これは後述するように、Galilei 数の指数を決定する上に必要なため、われわれは 6, 8, 10 mm の磁製ラシヒリングを 30 cm の高さに内径 6.06 cm のガラス円筒に不規則充填し、CO₂ (純度 99% 以上) を水により吸収せしめ、直接に液側抵抗を測定した。

実験装置の概略は Fig. 1 に示されている。

溶媒としては水道水を用い、これを定水位槽から温度調節用の蛇管に通し、さらに流量調節用コックおよび温度計を通り、液分配器より充填物上に分配せしめた。液分配器には長さ 30 mm、内径 4 mm のガラス管を 1.8 cm 間隙の正三角形配置で 7 本を配列したもので、上部の end effect をできるだけ少なくするために、これを充填層上端にできるだけ接近せしめた。充填層下方の液調節弁にはスクリーコックを用い、塔底での液面が一定に保たれるようにし(だいたい充填物支持板下 4 cm に保った)またここより気泡が放出されぬよう調節した。液流量は、単位時間当りの塔底からの放出流量から求めた。

実験操作としては水およびガスの流量を一定値に調節

Fig. 1 Schematic Diagram of CO₂-Absorption Apparatus

* 昭和 32 年 9 月 13 日受理、本報告は昭和 32 年 4 月 3 日化学工学協会第 22 年会において発表

** 名古屋大学工学部化学工学教室

*** Shulman は有効表面積 a のとり方を特別なとり方をしている。

Table 1 Some numerical examples of experimental results

Run	Liquid rate	Gas rate	Liquid temp. °C		Concentration of solute ($\times 10^3$ kg solute/kg solvent)		$k_L a$ (25°C)	(H.T.U.) _L
	L [kg/m ² hr]	G [kg/m ² hr]	inlet	outlet	inlet (feed)	outlet (tower bottom)	(1/hr)	(m)
6 mm Raschig ring ($a_t=783$ m ² /m ³)								
2	23930	57.2	24.5	25.5	0.049	0.903	71.8	0.334
4	8350	39.2	24.8	25.8	0.025	1.080	31.7	0.264
6	2270	39.2	24.5	25.5	0.025	1.136	11.8	0.193
8	14530	46.2	25.0	25.8	0.025	0.921	46.7	0.312
8 mm Raschig ring ($a_t=588$ m ² /m ³)								
1	21850	38.0	24.1	25.5	0.054	0.968	66.2	0.331
3	15400	40.7	25.0	26.1	0.054	0.971	46.9	0.330
5	23850	35.6	24.0	24.8	0.054	0.928	66.9	0.358
7	10030	45.0	24.6	25.7	0.054	1.056	35.9	0.280
10 mm Raschig ring ($a_t=470$ m ² /m ³)								
4	12150	46.2	24.5	24.7	0.041	1.013	40.9	0.298
6	29090	29.4	24.0	25.2	0.041	0.853	74.2	0.394
8	4390	47.8	24.3	25.0	0.016	1.160	19.9	0.222
10	15400	32.9	24.1	25.3	0.016	0.974	48.9	0.316

し、20~30 分間放置、定常状態にあることを確かめてから、液濃度の測定を行った。この間、系の温度は温度調節用の蛇管の浴の温度を調節することにより、 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ に保つことができた。試料は液放出口に溜を置き、これより一定量とり、水酸化バリウム水溶液に入れ、濃度既知塩酸溶液にてフェノールフタレインを指示薬として逆滴定した。

さらに、end effect を決定するため、実験の二、三回は充填物支持板の直下に直径 2.5 cm の漏斗を取り付け、この濃度を塔底放出口の試料と同様に分析した。

§3. 実験結果

すでに述べたごとく、純炭酸ガスを用いたため、ガス側での物質移動抵抗はなく、界面抵抗がないと仮定すれば、液・ガス界面では常に塔内のガスの圧力（大気圧とほとんど等しい）における飽和濃度 c_s の状態にあると考えられるから、液側容量係数は次式で算出される。

$$k_L a = \frac{L}{\rho Z} \ln \frac{c_s - c_1}{c_s - c_2} \quad (1)$$

ここで飽和濃度 c_s は 25°C における値で、I. C. T. より

Fig. 2 $k_L a$ vs. L for 6 mm Raschig ring (O: repacked) Fig. 3 $k_L a$ vs. L for 8 mm Raschig ring Fig. 4 $k_L a$ vs. L for 10 mm Raschig ring

異があるかどうかを検討するため、6mm ラシッヒ環については再充填して容量係数を求めたが、Fig. 2に見られるごとく、再現性は良好であった。なお容量係数は(1)式で算出するのであるが、塔底での end effect を塔底からの流出液と充填層下の受皿から採取した液との分析から補正した。すなわち、これらはそれぞれ 6, 8, 10mm の充填物に対して充填層等価高さ 3.6, 3.5, 3.1cm を示した。Fig. 2, 3, 4に見られるごとく、液質量速度と容量係数とはかなりよい直線性を示し、これらはそれぞれ $1,000 < L < 30,000 \text{ kg/m}^2\text{hr}$ の範囲で、

$$6\text{mm ラシッヒ環} \quad k_{La} = 0.0473 L^{0.718} \quad (2)$$

$$8\text{mm ラシッヒ環} \quad k_{La} = 0.0470 L^{0.717} \quad (3)$$

$$10\text{mm ラシッヒ環} \quad k_{La} = 0.0466 L^{0.716} \quad (4)$$

により示され、これらの指数は Sherwood-Holloway のデータとだいたいにおいて一致している、

§4. 考 察

すでに指摘されているごとく、容量係数中の物質移動係数および有効表面積の操作変数や、系の物性常数に対する依存性は全く別個のものであり、これらを総括して論ずることはできない。それゆえ、ここでは有効表面積に関する適当な実験式を選んで、これにより物質移動係数を分離算出した。有効表面積については、これまで種々な実験式が提案されているが、これらの中でだいたい平均的な値を示し、かつデータのまとめ方も合理的である藤田⁹⁾の式を用いた。ただし、この式は濡れ表面積に関する式であるが、厳密に有効表面積を求める式はなく、有効表面積が濡れ表面積に一致、または比例するものと仮定した。このように分離した物質移動係数を何らかの形で、操作変数や系の物性と関係付けるのであるが、従来の方法は緒言で述べたごとく、二重境膜の仮定または伝熱とのアナロジーにより

$$(Sh) = c(Re)^m(Sc)^n \quad (5)$$

のごとくまとめられて来た。しかし充填塔内でしかも向流に流れている流体間の界面においてはもちろん、たとえそれが有効境膜に改良されたとしても、このようなモデルは考え難い。それゆえ、ここでは二重境膜説以外の理論、すなわちこれまでには滲透説およびこの改良として表面更新説が提案されているが、これを手掛りとしてまず物理吸収について考察する。しかし、充填塔内での現象は、非常に複雑であり、単純なモデル化は許されない。それゆえ、これ以上の理論的な解析手段は現在のところ用い得ず、次元解析によった。

1) 式の導出

* 例えば、藤田氏の文献⁹⁾により、もし $a = 0.8 a_w$ とすれば、後述の(12)、(13)式の係数は1.25倍となる。

充填塔内でのガスの液による物理吸収を取扱う場合、単位の接触面当りの平均の吸収速度 N およびこれから得られる液側物質移動係数 k_L はそれぞれ Whitmann の二重境膜説では⁸⁾

$$N = \frac{D_L}{x} (c^* - c_0), \quad k_L = D_L/x \quad (6)$$

Higbie の滲透説では⁴⁾

$$N = 2\sqrt{\frac{D_L}{\pi\theta}} (c^* - c_0), \quad k_L = 2\sqrt{D_L/\pi\theta} \quad (7)$$

で表わされる。ここで x は有効境膜の厚み $[L]$ であり、 θ は充填物上で液の曝される有効時間 $[T]$ で、いずれも充填塔では測定不可能な量である。これらは拡散恒数と前者は一次、後者は平方根で、見掛け測定可能な量 k_L と結びつけられる。

$$(6) \text{ 式から} \quad \frac{k_L[L]}{D_L} = 1 \quad (\text{無次元}) \quad (6a)$$

$$(7) \text{ 式から} \quad \frac{k_L[T^{1/2}]}{D_L^{1/2}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \quad (\text{無次元}) \quad (7a)$$

(6a) の左辺が Sherwood 数であり、すなわち二重境膜説に示唆された無次元数と考えられる。同様に (7a) の左辺は浸透説に基づく無次元数と考えられる。それゆえ、充填塔内での θ に関するような $[T]$ を持ってくれば恐らく (7a) 式はより合理的な取扱いができれば、幾度も述べるように充填塔内での現象の複雑さのために、さらに厳密な取扱いを進めることは現在のところできない。それゆえ、ここでは θ に関して次元解析的な取扱いをした。

θ すなわち、液の曝される時間は操作条件、灌液の物性、塔および充填物の特性などによると考えるのが妥当であるから

$$\theta = f(\rho, \mu, g, D_t, a_t, L, \dots), \quad (8)$$

として次元解析を行った。次元解析の結果、いろいろの組合せが考えられるが、これまでの液側物質移動係数の実験や検討を考慮して、次式を選んだ。

$$\frac{1}{\theta} \left(\frac{\rho}{a_t L} \right) = c' \left(\frac{L}{a_t \mu} \right)^{m'} \left(\frac{\rho^2 g}{\mu^2 a_t^3} \right)^{n'} (D_t \cdot a_t)^{p'} \quad (9)$$

(7) および (9) 式から

$$\frac{k_L(\rho a_t L)^{1/2}}{D_L^{1/2}} = c \left(\frac{L}{a_t \mu} \right)^m \left(\frac{\rho^2 g}{\mu^2 a_t^3} \right)^n (D_t \cdot a_t)^p \quad (10)$$

が得られる。

以下、われわれの実験および、これまでに行われた物理吸収についての実験をもとにして、指数および恒数を決定した。ただし、式中の拡散恒数は Wilke-Chang の式¹⁹⁾を、溶媒の粘度、密度は化工便覧の値を用いた。また単位充填層当りの充填物総表面積 a_t は、記述のないものには Fig. 5 から求めた実験式

$$a_t = 4.7/D_p \quad (11)$$

より求めた。

2) (Re) への依存性

(10) 式中の $(Re) (=L/a_i\mu)$ の指数は、われわれの実験、Sherwood-Holloway¹¹⁾、Vivian-Whitney¹²⁾、Deed-Schutz-Drew¹³⁾、疋田ら⁵⁾ のデータを用いて検討した。すなわち、これらのデータをすべて記載すると非常に複雑になるので、その二、三の例を示したのが Fig. 6 である。(すべてのデータを網羅したものは Fig. 9 を参照)。図は $k_L(\rho/a_iL)^{1/2}/D_L^{1/2}$ vs. $(L/a_i\mu)$ が点綴さ

Fig. 5 a_i vs. D_p

Fig. 6 $k_L(\rho/a_iL)^{1/2}/D_L^{1/2}$ vs. $L/a_i\mu$

Fig. 7 $k_L(\rho/a_iL)^{1/2}/D_L^{1/2}$ vs. $(\rho^2g/\mu^2a_i^3)$

れてある。すなわち、 $0.5 < (Re) < 500$ の範囲にわたって (10) 式の (Re) の指数 $m=0$ が与えられる。ここで興味深いことは $[T] \equiv (\rho/a_iL)$ と L を含ませることにより (Re) に対して $k_L[T^{1/2}]/D_L^{1/2}$ が依存性を示さないことである。

3) (Ga) への依存性

つぎに $(Ga) (= \rho^2g/\mu^2a_i^3)$ への依存性を調べるために (Re) の一断面をとり、この断面について、 $k_L(\rho/a_iL)^{1/2}/D_L^{1/2}$ vs. (Ga) を点綴したのが Fig. 7 である。この直線の勾配から、指数 $n=0.38$ となる。 (Ga) の範囲は $2.5 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^7$ である。

4) $(D_i \cdot a_i)$ への依存性 (塔径への依存性)

充填物が 1" ラシッヒ環の場合が、もっとも種々な塔径で実験が行われているので、これについて考察した。すなわち、Sherwood-Holloway は 20" の塔径で、Vivian-Whitney は 4" と 14" の塔径で、さらに疋田らは 25mm ラシッヒ環の場合について 7.0cm および 12.5cm の塔径で吸収実験を行っている。これらのデータについて $k_L(\rho/a_iL)^{1/2}/D_L^{1/2}$ vs. $(D_i \cdot a_i)$ を点綴したのが Fig. 8 で図に見られるごとく、塔径への依存性を示していない。 $(p=0)$

5) 結果

これらの結果を総括したのが Fig. 9 である。図に見られるごとく、前記諸実験はすべて $\pm 20\%$ 以内で、次式によって表わすことができる。

$$\frac{k_L(\rho/a_iL)^{1/2}}{D_L^{1/2}} = 0.0125 \left(\frac{\rho^2g}{\mu^2a_i^3} \right)^{0.38} \quad (12)$$

さらに (12) 式に

Fig. 8 $k_L(\rho/a_iL)^{1/2}/D_L^{1/2}$ vs. $(D_i \cdot a_i)$ for 1" Raschig ring

示されているように a_i と D_p は反比例するから、 D_p を用いて (12) 式を書き直せば、

$$\frac{k_L(\rho D_p/L)^{1/2}}{D_L^{1/2}} = 4.64 \times 10^{-3} \left(\frac{\rho^2 g D_p^3}{\mu^2} \right)^{0.38} \quad (13)$$

となる。これらの式の右辺は単に (Ga) のみの函数であり、従来の諸関係式に比較して簡単であり、またこのような型に置き得たことにより後述することく、種々興味ある関係を選び出すことができた。

6) 結果の考察

以上の (12), (13) 式が本報の要点であるが、さらにつぎのようにして、諸文献との比較検討を行った。すなわち (13) 式をこれまでの (5) 式の型のごとく (Re) , (Sc) の依存性と比較するために、(13) 式より (Sh) 数をつくれば

$$\frac{k_L D_p}{D_L} = 4.64 \times 10^{-3} \left(\frac{L D_p}{\mu} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{\rho D_L} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho^2 g D_p^3}{\mu^2} \right)^{0.38} \quad (14)$$

となり、この式と従来の諸結果^{9), 11), 14), 18)} と照合すれば、 (Sc) の指数もまたよく一致している。

さらに近似的に (Ga) の指数の 0.38 を $1/3$ とすれば、(12) 式は

$$k_L(\rho/\mu g)^{1/3} = c(Re)^{1/2}(Sc)^{-1/2} \quad (15)$$

のごとく与えられ、この式はさらに

$$\frac{k_L(\mu^2/\rho^2 g)^{1/3}}{D_L} = 0.0125 \left(\frac{L}{a_i \mu} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{\rho D_L} \right)^{1/2} \quad (15')$$

のごとく、変型 (Sh) , (Re) および (Sc) の関係式にみちびくことができる。

(10) 式および (12) 式の左辺は (7a) 式中の $[T]$ として $(\rho/a_i L)$ を用いたことになるが、この $(\rho/a_i L)$ は変数として (8) のごとく選んだ場合に得られた次元解析の結果の一つであるが、これはつぎのごとく考えることもできる。すなわち $(\rho/a_i L)$ は (ρ/L) すなわち L を $\rho \cdot \bar{u}$ と考えれば $(1/\bar{u})$ に相当するものと、 $1/a_i$ すなわち (11) 式から充填物の代表長さ D_p に相当するものとを積、すなわち $(D_p/\bar{u})$ に比例することになる。換言すれば、 $\bar{u}$

は見掛けの上での充填塔内の平均流速であるから、 $(\rho/a_i L)$ は見掛けの上での平均の 1 個の充填物上を通過するに要する時間に比例したものとも言える。これは、Sherwood が (Re) として $(L/a_i \mu)$ をとったと同様、見掛け上の値である。

§5. 要 約

1) 充填物 6, 8, 10mm ラシッヒ環を充填高さ 30cm に充填した直径 6cm の塔を用いて、水中への純炭酸ガスの吸収実験を種々な L について行い、Fig. 2, 3, 4 および (2), (3), (4) 式に示されるがごとき結果を得た。

2) 滲透説にもとづいて $k_L[T^{1/2}]/D_L^{1/2}$ なる無次元項によって充填塔における液側物質移動係数をまとめることを考えた。

3) 曝されている時間 θ に関して次元解析を行い、われわれの実験、Sherwood-Holloway, Vivian-Whitney, Deed-Schutz-Drew, 正田らのデータをもとにして実験式 (12), (13) 式および Fig. 9 で示されるがごとき結果を得た。この (12) および (13) 式は右辺に無次元項として (Ga) のみを含み、従来の諸関係式に比し著しく簡単である。

4) 従来の諸関係式と比較するために (13) 式を変型して得られた (14) 式から、 k_L は濡壁塔および液柱塔と同様に、 $(L D_p/\mu)$ の $1/2$ 乗に比例することを明らかにした。また (12) 式の (Ga) の指数を $1/3$ と近似することにより、変型 (Sh) を導びきうるとともに、より簡単な (15) 式を得た。

本報告発表に当り種々御懇篤なる御指導を得た八田教

Fig. 9 $k_L(\rho/a_i L)^{1/2}/D_L^{1/2} Ga^{0.38}$ vs. $L/a_i \mu$

授に厚く謝意を表するものである。

Nomenclature

a :	effective surface area of packings	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$
a_t :	total surface area of packings	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$
c_1 :	concentration of solute in liquid at the top of the tower	$[\text{kg}/\text{kg solvent}]$
c_2 :	concentration of solute in liquid at the bottom of the tower	$[\text{kg}/\text{kg solvent}]$
c_s :	concentration of solute in liquid corresponding to equilibrium with solute	$[\text{kg}/\text{kg solvent}]$
D_L :	diffusion coefficient of solute in liquid phase	$[\text{m}^2/\text{hr}]$
D_p :	nominal diameter of a packing piece	$[\text{m}]$
D_p' :	diameter of a sphere possessing the same surface area as a packing piece	$[\text{m}]$
D_t :	diameter of the tower	$[\text{m}]$
g :	gravity acceleration	$[\text{m}/\text{hr}^2]$
k_L :	liquid-side mass-transfer coefficient	$[\text{m}/\text{hr}]$
L :	flow rate of liquid	$[\text{kg}/\text{m}^2\text{hr}]$
x :	effective film thickness	$[\text{m}]$
z :	packing height	$[\text{m}]$
θ :	exposure time of a liquid element	$[\text{hr}]$
μ :	viscosity of liquid	$[\text{kg}/\text{mhr}]$
ρ :	density of liquid	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

Literature

- 1) Deed, D. W., Schutz, P. W., & Drew, T. B. : *Ind. Eng. Chem.*, **39**, 766 (1947)
- 2) Fujita, S., Niwa, Y. & Hashimoto, M. : *Chem. Eng. (Japan)*, **18**, 216 (1954)
- 3) Fujita, S., Sakuma, S. : *Chem. Eng. (Japan)*, **18**, 64 (1954)
- 4) Higbie, H. : *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **31**, 365 (1935)
- 5) Hikita, H., Kamo, K. & Sugata, M. : *Chem. Eng. (Japan)*, **18**, 454 (1954)
- 6) Kling, G. : *Chem. Ing. Techn.*, **25**, 577 (1953)
- 7) Leva, M. : "Tower Packing & Packed Tower Design," p. 7 (1953)
- 8) Lewis, W. K. & Whitman, W. C. : *Ind. Eng. Chem.*, **16**, 1215 (1924)
- 9) Molstad, M. C., et. al. : *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **38**, 410 (1942)
- 10) Ramm, W. M. : "Absorptionsprozesse in der chemischen Technik," p. 229 (1953)
- 11) Sherwood, T. K. & Holloway, F. A. L., : *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, **36**, 39 (1940)
- 12) Sherwood, T. K. & Pigford, R. L. : "Absorption & Extraction," p. 226 (1952)
- 13) Ibid, p. 354.
- 14) Shuluman, H. L., et. al. : *A. I. Ch. E., Journal*, **1**, 253 (1955)
- 15) van Krevelen, D. W. & Hofstijzer, P. J. : *Chem. Eng. Progress*, **44**, 529 (1948)
- 16) Ibid : *Recueil des Trav. Chim. des Pays Bas*, **66**, 513 (1947)
- 17) Vivian, J. E., & Whitney, P. R. : *Chem. Eng. Progress*, **43**, 691 (1947)
- 18) Ibid., **44**, 54 (1948)
- 19) Wilke, C. R., & Chang, P. : *A. I. Ch. E., Journal*, **1**, 264 (1955)

Liquid-side Mass-transfer Coefficient for a Tower Packed with Raschig Rings

K. Onda*, E. Sada* and F. Ôtubo*

1) Absorption of pure CO_2 in water was investigated using a 6-cm-dia. tower, packed with 6 mm, 8 mm and 10 mm Raschig rings. The results are shown in Figs. 2, 3, and 4 and by Eqs. (2), (3) and (4).

2) Based on the theory of penetration, the correlations of k_L were studied in the form of $k_L[T]^{1/2}/D_L^{1/2}$ to $(L/a_t\mu)$, $(\rho^2g/a_t^3\mu^2)$ and $(D_t a_t)$, where T =exposure time.

3) The data of Sherwood-Holloway, Vivian-Whitney, Deed-Schutz-Drew, Hikita and the authors were reasonably correlated as shown in Fig. 9. The center line in Fig. 9 is expressed by Eqs. (12) and (13).

4) Eq. (14) derived from Eq. (13) shows that k_L is in proportion to $(LD_p/\mu)^{1/2}$. By estimating the power of (Ga) roughly at 1/3, Eq. (12) has been simplified into Eq. (15), its modification Eq. (15') representing modified Sherwood number.

* Dept. of Chem. Eng., Faculty of Eng., Nagoya Univ., Nagoya