HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	狭間隔浮遊層反応装置の基礎的研究とその応用（第2報） ： 円筒型浮遊層内の物質移動
Author(s)	藤川, 昌久; 阿野, 誠哉; 久郷, 昌夫
Citation	北海道大學工學部研究報告, 69, 177-189
Issue Date	1973-11-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41174
Type	departmental bulletin paper
File Information	69_177-190.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

狭間隔浮遊層反応装置の基礎的研究とその応用（第2報）

——円筒型浮遊層内の物質移動——

藤川昌久*　阿野誠哉*　久郷昌夫*

（昭和48年4月28日受理）

Studies on Suspension Bed Reactor with Narrow Spacing (II)

— Mass Transfer of Cylindrical Suspension Bed —

Masahisa FUJIKAWA, Seiya ANO and Masao KUGO

(Received April 30, 1973)

Abstract

A suspension bed is a method expected to be of higher efficiency for the gas-solid contact than that of the fluidized bed. In this suspension bed the gas velocity has values of 0.6–1.0 of u/u_t which is considerably higher than that in regular fluidization.

The present experiments were carried out with drying of a constant rate period for silica gel particles to measure the mass-transfer coefficient which would depend on the gas velocity, the diameter of particles as well as the cylinder and the weight of suspended particles. An experimental equation for the coefficient was obtained as follows:

$$Sh_p = 3.0 \times 10^4 \, Re_p^{1.5} \, Ga^{0.5} \, (Mu/\mu)^{-1.25}$$

It was noted that the larger the diameter of the cylinder, the least effective the contact efficiency becomes owing to the decrease of the well effect of particles which might otherwise promote efficiency.

1. まえがき

これまで工業的に利用されている流動層では，ガスの大部分が気泡となって層内を通過するため，気固の接触効率は考えられるほど大きくない。浮遊層はこれらの欠点を克服するため，ガス流速を増大し，粒子群とガスとの混合を激しくして，粉粒体とガス体との間の接触効率を高めようとしたものである。

整流板をつけた円筒型浮遊層は，流動層とほぼ同じ形態ではあるが，ガス流速 u と粒子終端速度 u_t との比，u/u_t を 0.6–1.0 に上げることによって，スラツギングを形成しないで，比較的良好な気固間の浮遊懸濁した流動状態を得ることが出来る。この時の条件は塔径 D_T，粒径 d_p，浮遊層高 L，浮遊層内粒子密度等の相関において，前報[1]で示した。これによっても反応装置を設計することが出来るが，実際には粒子-流体間の物質移動，熱移動機構が，主要因子として密接に関連してくるので，本報ではシリカゲルの恒率乾燥実験より，物質移動係数 k_G を求めて，気固の接触効率に影響を与える諸因子との関係を明らかにした。

* 応用化学第一講座

2. 浮遊層における物質移動

2.1 物質移動係数

適当水分のシリカゲル粒子の浮遊層中で，**図1** のごとく微小高さ dL について物質収支をとる。入口，出口の空気の湿度 H_1, H_2 を水分濃度 C_1, C_2 に換算し，空気流速 u, 粒子比表面積 a, 物質移動係数 k_G, 粒子上の空気の飽和水分濃度 C_s とする。C_s は粒子表面温度が出口空気湿球温度に等しいと仮定し，その温度における水蒸気飽和濃度を用いることにする。定常状態では

$$udC-k_Ga(C_s-C)dL=0 \tag{1}$$

となり，これを解いて

$$k_G=(u/aL)ln[(C_s-C_1)/(C_s-C_2)] \tag{2}$$

が得られる。粒子からの単位時間当りの蒸発量 N は恒率乾燥期間中は $dN/d\theta=0$ であるから塔の断面積を A とすると

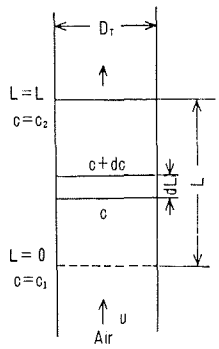

図1 浮遊層乾燥モデル

$$N=uA(C_2-C_1) \tag{3}$$

となり，これへ (2) 式を代入し，浮遊層の容積を $V=LA$ とすると

$$N=k_GaV\frac{C_2-C_1}{ln[(C_s-C_1)/(C_s-C_2)]}=k_GaV\Delta C_{lm} \tag{4}$$

となり，ΔC_{lm} は入口，出口の空気中の水分の対数平均濃度差であって，水分蒸発の推進力と考えられる。すなわち恒率乾燥実験を行って，各条件における N, ΔC_{lm} を実測することにより，次式により k_G を求めることが出来る。

$$k_G=N/aV\Delta C_{lm} \tag{5}$$

k_G は各条件の影響を受けるが一般に物質移動においては，粒径基準のレイノルズ数 $Re_p=d_pu\rho_g/\mu$ と粒径基準のシャーウッド数 $Sh_p=k_Gd_p/D_G$ との間に相関が認められる。ここに D_G は空気中の水蒸気の分子拡散係数である。

2.2 既往の研究

これまで浮遊層領域における研究は見当らないが，流動層における粒子-流体間の物質移動の研究では，Kettenring ら[2] はシリカゲル，アルミナ粒子からの水の恒率乾燥実験を，塔径 58 mm, 粒径 14–48 mesh, 空気流速 28–83 cm/sec (250–750 lb/hrft², $\rho_g=1.2$kg/m³ として) の範囲で行って k_G を求め次のように整理している[3]。

$$Sh_p=k_Gd_p/D_G=0.0180\,Re_p^{1.3} \quad 9<Re_p<55 \tag{6}$$

また Richardson ら[4] は活性炭流動層での CCl_4 の吸着実験による初期吸着速度およびシリカゲル流動層での空気の脱湿実験から k_G を測定して

$$Sh_p=0.374\,Re_p^{1.18} \qquad 0.1<Re_p<15 \tag{7}$$

$$Sh_p=2.01\,Re_p^{0.5} \qquad 15<Re_p<250 \tag{8}$$

を得ている。さらに Heertjes[5] は同様にシリカゲル空気系で恒率乾燥実験より伝熱と物質移動の間に次の関係をみとめている。

$$h_p/k_G=1.03\,\rho_gC_p \qquad 6<Re_p<70 \tag{9}$$

2.3 次元解析

浮遊層中の物質移動に影響する因子と次元として，次のものが考えられる。すなわち塔径 D_T $[L]$, 粒子径 $d_p[L]$, ガス流速 $u[LT^{-1}]$, 浮遊量 $M[ML^{-2}]$, ガス密度 $\rho_g[ML^{-3}]$, 粒子密度 ρ_s $[ML^{-3}]$, ガス粘度 $\mu[ML^{-1}T^{-1}]$, 拡散係数 $D_G[L^2T^{-1}]$ ならびに重力加速度 $g[LT^{-2}]$ が物質移

動係数 $k_G[LT^{-1}]$ に関係している。このため基本式として

$$k_G=(\text{const})\,D_T^a d_p^h u^e M^d \rho_g^c \rho_s^f \mu^g D_G^h g^i \tag{10}$$

が得られる。これを解いて無次元項に組み合わせると，

$$\left(\frac{k_G d_p}{D_G}\right)=(\text{const})\left(\frac{D_T}{d_p}\right)^a\left(\frac{d_p u\rho_g}{\mu}\right)^{c-d}\left(\frac{Mu}{\mu}\right)^d\left(\frac{\rho_s}{\rho_g}\right)^f\left(\frac{\mu}{\rho_g D_G}\right)^{c+g+2i}\left(\frac{d_p^3 g\rho_g^2}{\mu^2}\right)^i \tag{11}$$

となる。ここで $k_G d_p/D_G$ はシャーウド数 Sh_p，$d_p u\rho_g/\mu$ はレイノルズ数 Re_p，$\mu/\rho_g D_G$ はシュミット数 Sc ならびに $d_p^3 g\rho_g^2/\mu^2$ はガリレイ数 Ga である。また D_T/d_p は塔径と粒径との比で，ρ_s/ρ_g は粒子とガスとの密度比を表している。また Mu/μ は $M=L_0(1-\varepsilon_0)\rho_s$ とおけることから，$(Mu/\mu)=[L_0(1-\varepsilon_0)u\rho_g/\mu](\rho_s/\rho_g)$ となり，L_0 を代表とした一種のレイノズル数とも考えられる。

3. 実験装置と方法

実験装置はガラス製で，**表1**の塔径のものを用い，整流板は 200 mesh の金網を使用した。フローシートを**図2**に示す。実験試料は**表2**の粒径のシリカゲル ($\rho_g=1.51$ g/cm^3) で，平均粒径 d_p には幾何平均を用いた。これらを予め水で湿らせ，一昼夜熟成させて適当な含水率 W にする。シリカゲルの限界含水率 W_c は 0.29 g/gdry であるが，余り湿りすぎると粒子同士が付着して好ましくないので，0.32–0.45 g/gdry の間，おおむね 0.35–0.40 g/gdry になるように W を調節した。

実験操作はまず塔下部よりブロワーで所定の室温空気を送入し，入口空気の乾，湿球温度 T_{D_1}，T_{W_1} より入口空気湿度 H_1 を求める。次に水分 W_0 の所定量のシリカゲルを投入し，浮遊層を形成させ，その最終時の出口空気の乾，湿球温度 T_{D_2}，T_{W_2} より出口空気湿度 H_2 を求める。それぞれの所定時間経過後，浮遊流動を停止して直ちに取り出し，試料中の残存含水率 W を測定する。含水率は 140–150°C のオーブンで1時間の乾燥減量により求めた。また入口，出口の空気湿度より，それぞれの水分濃度 C_1，C_2 を，また T_{W_2} に相当する飽和水蒸気量より C_s を算出

表1　使用塔径

D_T [mm]	14.1	23.8	38.0	50.3	65.0	87.0

表2　使用粒子性状
（ミリカゲル，$\rho_s=1.51$ g/cm^3）

粒径範囲 [mesh]	平均粒子径 d_p [mm]	終端速度 u_t [cm/sec]
9～12	1.678	1038
12～16	1.185	598
16～20	0.953	452
20～28	0.700	376
28～35	0.496	272
35～42	0.382	211
42～48	0.321	172
48～60	0.231	142
60～80	0.207	106

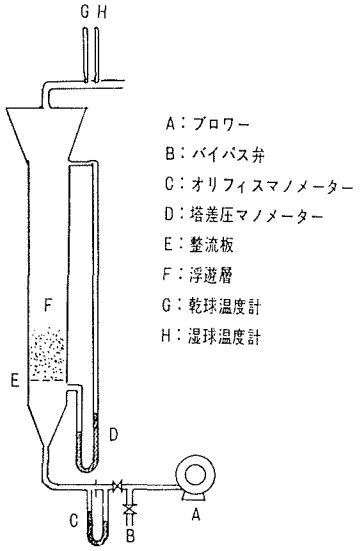

図2　実験装置フローシート

し，ΔC_{lm} を計算した。

水分の移動量はシリカゲル中の含水率変化によって測定される。塔内の乾量基準浮遊量を M'_D とし，恒率乾燥段階であるので，経過時間 θ と W_0-W は一次比例する筈で，その間の含水率変化量 N' を

$$N'=N/M'_D(W_0-W)/\theta \tag{12}$$

として算出し，N' がほぼ一定になっている値を用いた。いま簡単に a を形状係数 ϕ と空隙率 ε とで

$$a=6\phi(1-\varepsilon)/d_p \tag{13}$$

として表わし，浮遊粒子のみの容積を V_p とすると

$$V_p=V(1-\varepsilon)=M'_D(1+W_c)/\rho_s \tag{14}$$

で表わされる。結局 (4) 式より k_G は

$$k_G=N'd_p\rho_s/6\phi(1+W_c)\Delta C_{lm} \tag{15}$$

となり，いま粒子を球と仮定すると $\phi=1$ であり，$W_c=0.29$, $\rho_s=1.51$ をそれぞれ代入すると

$$k_G=0.195\ d_p\ N'/\Delta C_{lm} \tag{16}$$

によって計算される。

さらに k_G より Sh_p を計算したが，D_G として 20°C, 1 atm の値，0.282 cm²/sec を使用した。

4. 実験結果と考察

前報[1] の浮遊層における粒子挙動の研究からも明らかであるが，塔径に応じて空気流速を適当に選んで，良好な浮遊層を形成させることが必要である。良好な浮遊層においては空気と粒子間の物質移動も大きくなると考えられる。このためまず塔径と空気流速，浮遊量による影響を調べ，ついで浮遊層に影響すると思われる諸因子について調べた。

4.1 予 備 実 験

4.1.1 空気流速と塔径の影響

粒径 $d_p=0.382$ mm (35–42 mesh), 浮遊量 $M=3$ g/cm² と一定にしておいて，塔径 D_T を 14.1, 23.8, 38.0, 50.3 mm の 4 種類に，空気流速比を $u/u_t=0.3$–1.0 の範囲で変えて実験した。乾燥経過時間 θ に対する含水率変化量 W_0-W の関係の一例を示すと，**図 3** の如く恒率乾燥段階を示している。これらのデータより k_G を算出した。塔径を変えた時の u/u_t と k_G との関係を**図 4** に

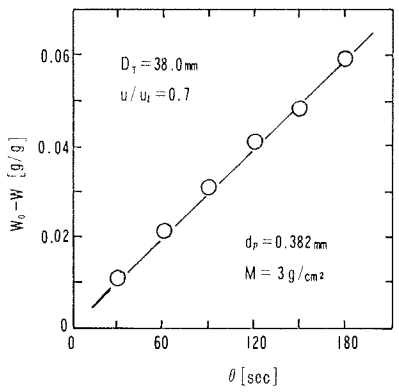

図 3 乾燥時間との水の蒸発量

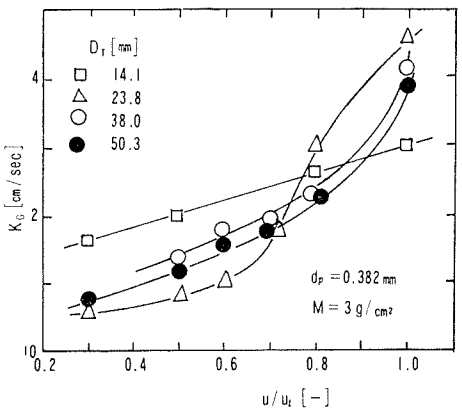

図 4 空気流速と k_G

示した。u/u_t の増大につれて k_G は増大し，u/u_t=0.7–0.8 から急増しており，特に D_T=23.8 mm において著しい。D_T の影響では u/u_t ＜0.6 では細い管が，u/u_t ＞0.6 では太い管が k_G が一般に大きい。これは前報[1] の粒子挙動に関連させてみると，ある D_T に対して最適 u/u_t が存在するものと考えられ，この実験範囲では良好な浮遊状態を得るには，**表 3** の如き流速範囲が適当していると思われる。

表 3　流速範囲

塔　径 D_T [mm]	流速範囲 u/u_t [−]
14.1	0.60～0.74
23.8	0.60～0.70
38.0	0.54～0.72
50.3	0.50～0.66

4.1.2　空気流速比と浮遊量の影響

最も浮遊状態が良いと観察された D_T=23.8 mmで d_p=0.496 mm の粒子を用いて，u/u_t と M を変えて実験した。このうち M=3 g/cm² の場合について前項の実験結果と共に示すと，**図 5** のごとき関係が得られ，d_p の大きいものほど浮遊層領域における k_G が大きい，すなわち浮遊状態が良い。しかし流動層に近いところや，輸送層に近いところでは粒径による影響は余り認められなかった。また u/u_t の増大につれて k_G の増大割合が減るのは u_t に近い空気速度のため，層内に吹き抜けが生じたものと考えられた。さらに塔径，粒径，空気流速比を一定にしておいて浮遊量を変えた場合は，**図 6** のごとくになり，M=2–6 g/cm² の範囲内において k_G は M にほぼ逆比例しており，浮遊層内の動きが悪化することを示した。

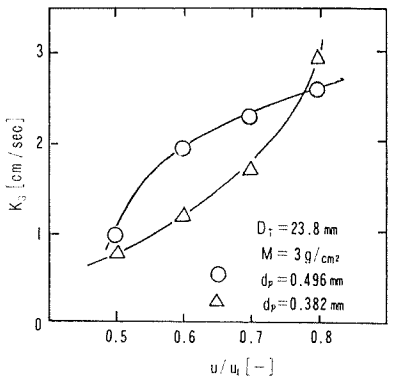

図 5　空気流速と k_G

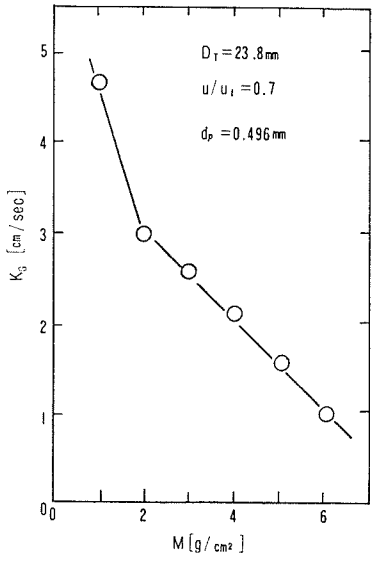

図 6　浮遊量と k_G

4.1.3　実験上の留意点

この予備実験によって指摘されたことは，乾燥実験中に浮遊層高が時間的変化を伴っていたことである。含水率の大きい初期には粒子の動きが悪く，層高も低くて流動層に近い粒子運動であった。すなわち最初は水分を多く含む粒子同士が付着して，何個かが一つの塊となって運動しており，乾燥の進むにつれて本来の運動状態を示すものと思われる。今後の実験においては粒子同士が付着しない程度に含水率を下げて，層内粒子運動が時間経過と共に一定になるように努めなければならない。そのため恒率乾燥期間となる含水率範囲が狭くなるため，実験時間が短くなり，以下の実験は非常に困難なものになった。

4.2　浮遊層に影響を及ぼす諸因子の検討

浮遊層では粒子の運動状態が物質移動に大きく影響することがわかった。このため諸因子の影響を検討するため，ある基準により塔内の粒子運動を規定して比較する必要がある。このため (1) 単位断面積当りの浮遊量を一定としておいて，粒径に相応した一定の空気流速比で浮遊させた場合，(2) 静止層高／塔径が1になるような浮遊量を装入し，一定空気流速比で浮遊させた場合，(3) 浮遊量を (1) と同じに一定とし，浮遊層高がある一定の高さとなるように空気流速比を調節して浮遊させた場合の3者について塔径と粒子径を変えて検討することにした。

4.2.1 浮遊量と空気流速比を一定とした時

単位断面積当りの浮遊量 M と空気流速比 u/u_t を一定として，塔径を6種類，粒子径を9種類変えて同様に k_G を測定した。良好な浮遊層を得るために u/u_t を 9–28 mesh 間の粒子では 0.5, 28–80 mesh 間の粒子では 0.7 と一定にした。k_G に対する D_T, d_p および D_T/d_p による深い相関はみられなかった。そこで Re_p と Sh_p を算出して検討した。まず d_p と Sh_p との関係をみると**図7**に示すように u/u_t による違いはあるが，$Sh_p \propto d_p^3$ の関係がみられ，d_p が 0.496 mm 以下の小粒子では D_T が 23.8, 14.1, 38.0 mm の順に高い Sh_p の値を示し，20–30 mm の間に最高の点があるように認められた。この塔径付近ではスラツギングが生じ難く，良い浮遊層が得られるとの前報[1]の結果と良く一致した。さらに塔径と粒子径との比，D_T/d_p は浮遊層の状態を示す無次元項の一つと考えられるので，これと Sh_p との関係を求めると，**図8**のごとく D_T/d_p による平行線となり，一見 $Sh_p \propto (D_T/d_p)^{-3}$ の関係が認められるが，D_T の影響ではなく d_p^3 の効果が強く表れたもので，−3乗には意味が全然ないものと考えた。次に Re_p と Sh_p との関係をみると**図9**のごとくばらつきはあるが，ほぼ $Sh_p \propto Re_p^{1.5}$ となり，これより実験式を求めると，

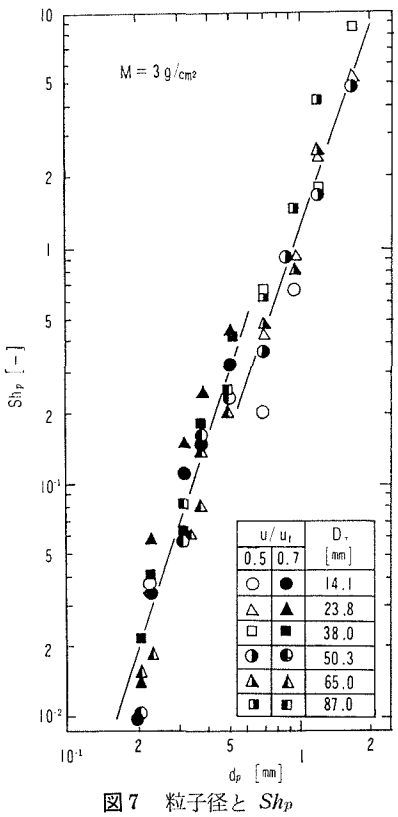

図7 粒子径と Sh_p

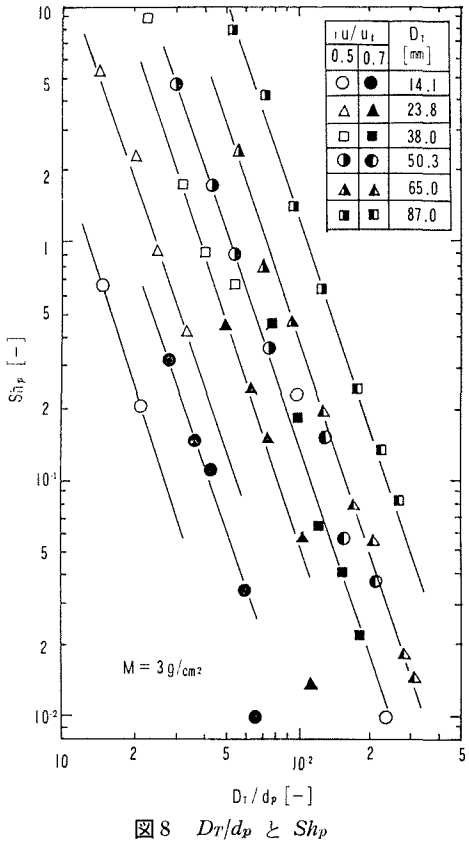

図8 D_T/d_p と Sh_p

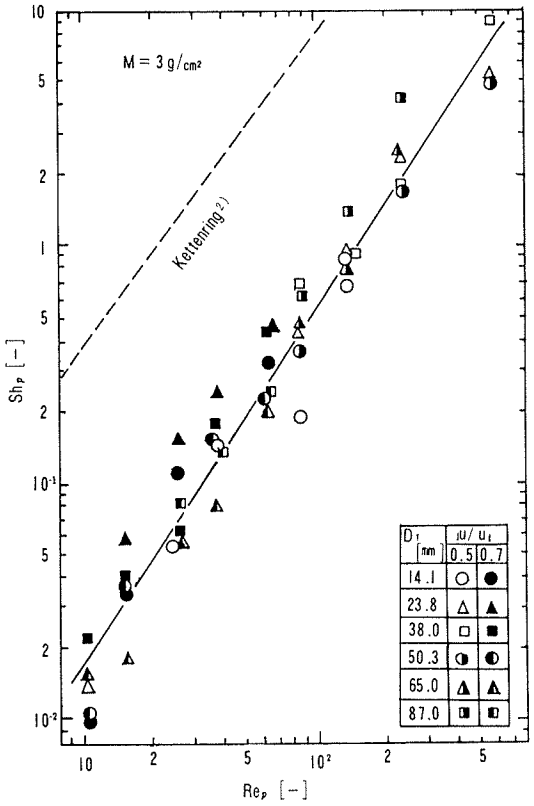

図9　Re_p と Sh_p

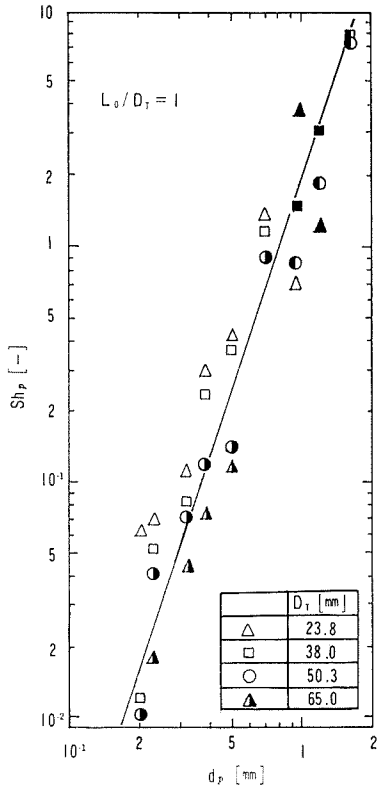

図10　粒子径と Sh_p

次式の通りであった。

$$Sh_p = 5.5 \times 10^{-4} Re_p^{1.5} \quad 10 < Re_p < 600 \tag{17}$$

4.2.2　浮遊量を静止層高／塔径＝1とし，空気流速比を一定とした時

前項の実験と同様な方法で，静止層高 L_0 と塔径 D_T とが等しくなるように試料を装入して浮遊させた場合の乾燥実験を行ない，k_G を測定した。塔径を4種類，粒子径を9種類変え，空気流速比 u/u_t は 9–12 mesh から 16–20 mesh 間および塔径が 65 mm における 20–28 mesh の粒子については 0.5，その他の粒子については 0.7 と一定にした。$L_0 = D_T$ になる粒子量 M' を装入し，単位断面積当りの浮遊量 M を算出する。前項同様に Re_p と Sh_p を算出した。k_G に対する d_p の影響は両対数紙上に D_T により異るほぼ同一勾配の直線として得られた。そこで Sh_p に対する d_p の影響をみると**図10**の如くになって，浮遊量一定の場合と同様に $Sh_p \propto d_p^3$ の関係が認められた。D_T の影響については一般に同一 d_p のものについては D_T の小さいほど Sh_p が大きくなった。これは D_T の小さいものほど接触効率が良いことを示し，D_T の増大は浮遊状態の悪化につながる。前項同様に塔径と粒子径との比，D_T/d_p をとり，Sh_p に対する影響をみると**図11**のごとくに多少のバラツキはあるが同一直線上にあり，$Sh_p \propto (D_T/d_p)^{-2.5}$ の関係が認められた。これは $L_0/D_T = 1$ としたため前項の**図8**の結果と異なり，浮遊量 M は塔径 D_T に比例しているため，塔径の影響を消去した結果を表しているが，これも d_p^{-3} の効果が強く表れているため，D_T/d_p の次数には殆んど意味がない。

さらに前項と同様に Re_p と Sh_p との関係を求めると**図12**のごとく D_T により異るが，同一

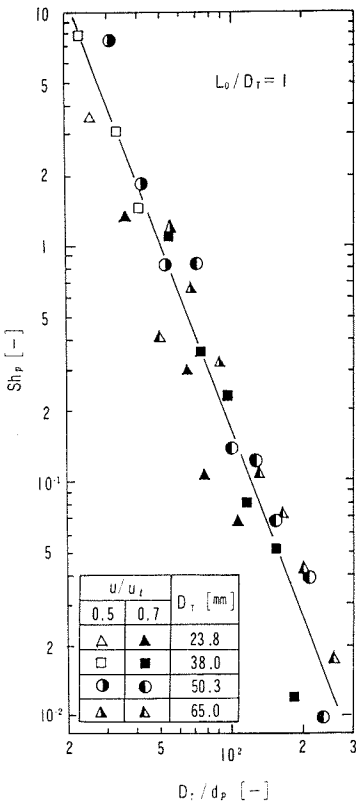

図11 D_T/d_p と Sh_p

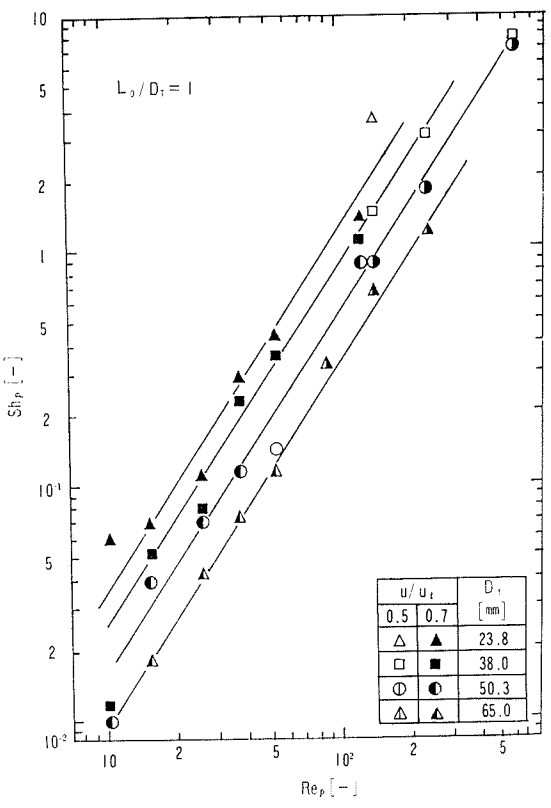

図12 Re_p と Sh_p

の勾配の直線が得られ，$Sh_p \propto Re_p^{1.5}$ の関係となり，同一 Re_p では D_T の小さいほど大きな Sh_p を示した。

この実験のように D_T の増大に比例して浮遊量 M を増大したときと，同一塔径で M のみ増大してそれぞれ静止層高 L_0 を増大させた場合について，Sh_p を比較してみると**図13**の如くになり，明らかに D_T を増大させて M を増大させた時の Sh_p が小さくなった。このことは塔径 D_T の増大につれての層内の浮遊状態の悪化を示している。このことはまた塔径を増大して浮遊量を増大，すなわち処理量の増大をはかる時には，塔径 D_T に反比例して浮遊量を減少させることによって D_T の小さな場合に匹敵する接触効率を保つことが出来るものと考えられる。

次に浮遊量 M の変化に対する Sh_p の変化をみると**図14**の如く，各粒径 d_p によって異るが Sh_p は M のほぼ -1.2 乗に比例していた。

この実験に次元解析で算出した (11) 式をあてはめて考えてみる。(D_T/d_p) の効果は d_p の3乗比例の効果が強いため殆んどないものと考えられ，$a \fallingdotseq 0$ としてよい。Re_p の効果は**図12**よりほぼ 1.5 乗に比例しているから，$c-d \fallingdotseq 1.5$ としてよい。(Mu/μ) の効果は**図14**で M の -1.2 乗に比例していたが，u の影響もあるため，Sh_p と Mu との関係をみると，$Sh_p \propto (Mu)^{-1.25}$ の関係が認められ $d=-1.25$ とした。この実験では $L_0=D_T$ であり，**2.3** 項で指摘したように，L_0 に D_T を代入し $(\rho_s/\rho_g)^f$ の項と共に考えると，塔径の効果を表す一種のレイノルズ数とも考えられる。Gaの効果は，**図10**で d_p の3乗に比例しているが，d_p の効果は (D_T/d_p) と Re_p とにも表れていると考えると，Re_p の 1.5 乗を考慮に入れて，$i=0.5$ と評価することにした。(ρ_s/ρ_g)

と Sc はこの場合常数であるため (const) に含まれる。そこで実験データより $(Re_p)^{1.5}$ $(Ga)^{0.5}$ $(Mu/\mu)^{-1.25}$ を計算すると良好な相関を示し，const$=3.0\times10^4$ を得た。すなわち実験式として

$$Sh_p=3.0\times10^4\ Re^{1.5}\ Ga_p^{1.5}\ (Mu/\mu)^{-1.25} \tag{18}$$

ただし $10<Re_p<600$, $L_0/D_T=1$, $M<5$ を得た。これを**図15**に示した。

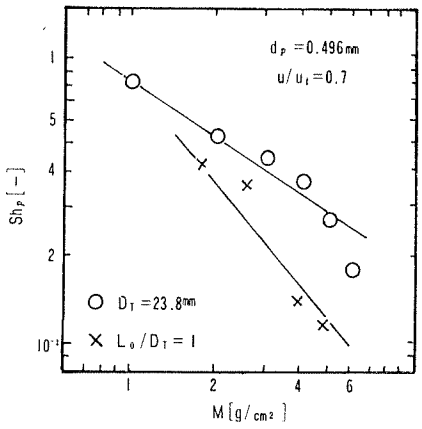

図13　浮遊量と Sh_p

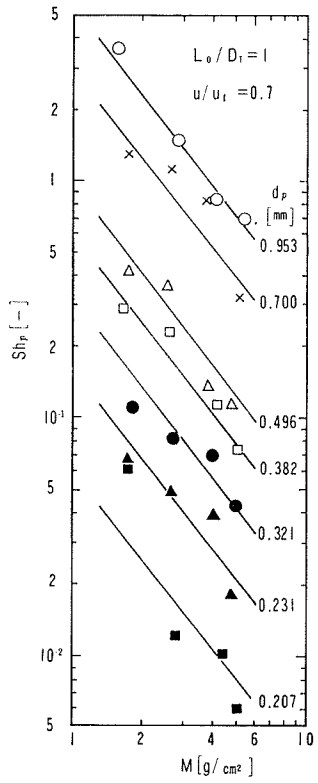

図14　浮遊量と Sh_p

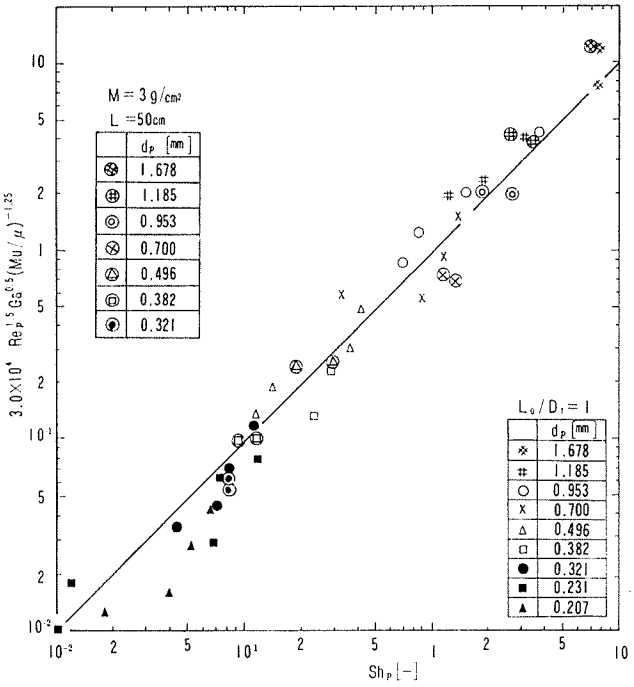

図15　Sh_p の実験式による計算結果

4.2.3　浮遊層高が一定となる空気流速で浮遊した時

浮遊状態が良好だと認められる浮遊層は，粒子が均一に浮遊し，層高も比較的高くなっている。このため $M=3$ g/cm² に一定とし，d_p の大小によって浮遊層高 L が 50 cm になるように空気流速 u/u_t を変えて，塔径を2種類，粒子径を9種類変えて恒率乾燥実験を行ない，同様に k_G を測定し，Sh_p を算出した。d_p と Sh_p との関係は**図16**に示すように D_T には関係せず，前項

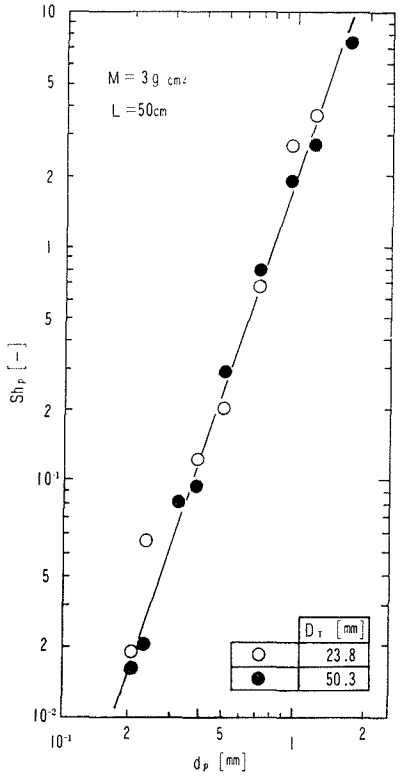

図16 d_p と Sh_p

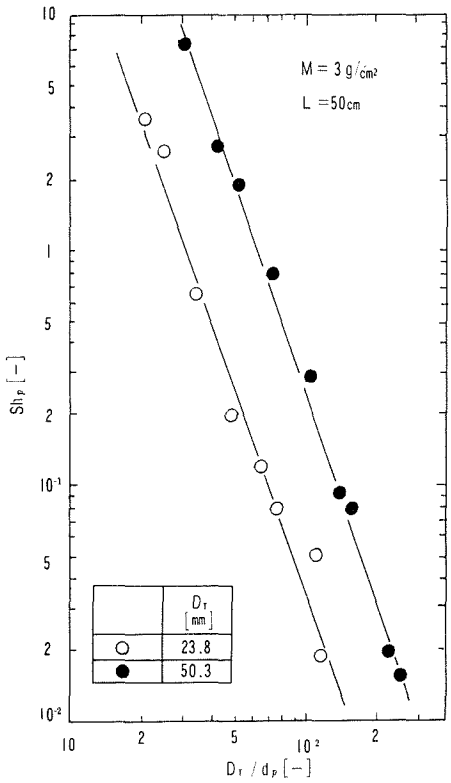

図17 D_T/d_p と Sh_p

の**図10**と同様に $Sh_p \propto d_p^3$ の関係が認められた。次に D_T/d_p と Sh_p との関係は図**17**に示すように，塔径の違いによる2本の直線となった。これは L が一定となるように u/u_t を変化させたため，D_T の違いによって浮遊分散状態の違いが生じたため，前項の**図11**のように同一直線上に乗らなかったものと考えられる。しかし両者とも $Sh \propto (D_T/d_p)^{-3}$ の関係となり，$M=$const, $u/u_t=$const のときの**図8**とよく似た結果となった。さらに Re_p と Sh_p との関係は**図18**に示すように，D_T により異る2本の直線として得られた。d_p と Sh_p との関係で D_T の影響が認められていないことから，塔内の浮遊状態の違いが表われたものと考えられる。すなわち $L=50$ cm の浮遊層高を保つためには塔径の大きい方が大きな空気流速を必要とし，またその流動状態も良くない。観察によると，空気の吹き抜けにより，みかけ上粒子は $L=50$ cm まで浮遊しているが，大部分の粒子は整流板から 20 cm 位の高さまでに滞留し，粒子と空気と接触が充分でなかった。このため Sh_p も小さくなったものと思われる。これに反し，D_T の小さい塔は，壁効果を受けて，小さな空気流速でも均一な浮遊層を形成し易いことになる。結局この実験のように空気流速を増大して，ある浮遊層高を保つことは，ある塔径以下の細い管でないと接触効率は向上し難いことを示している。

また前項の (18) 式について，同様に検討した結果を**図15**に表すと，同一実験式で整理出来た。

4.3 物質移動係数よりみた浮遊層の性能

4.3.1 粒子挙動と物質移動の関連

前報[1]と本実験とを対応して考察してみると，(1) 浮遊層においても流動層同様，粒子径の大

きい方が比較的良好な浮遊層が得易かったが，物質移動においても Sh_p は d_p^3 に比例して大きくなっていた。(2) 同一粒子径における塔径の影響をみると，D_T=20–30 mm 付近で最もスラツギングが生じ難く，また層内粒子分散密度分布が均一で，浮遊状態も良好であったが，k_G の値も浮遊層領域では塔径 23.8 mm で最大の値を示し，気固接触も良いと認められた。(3) 塔径が大きくなると，層内に吹き抜けが生じることにより，浮遊状態が悪化していたが，k_G の値も小さくなっており，気固接触の悪化によるものと考えられる。

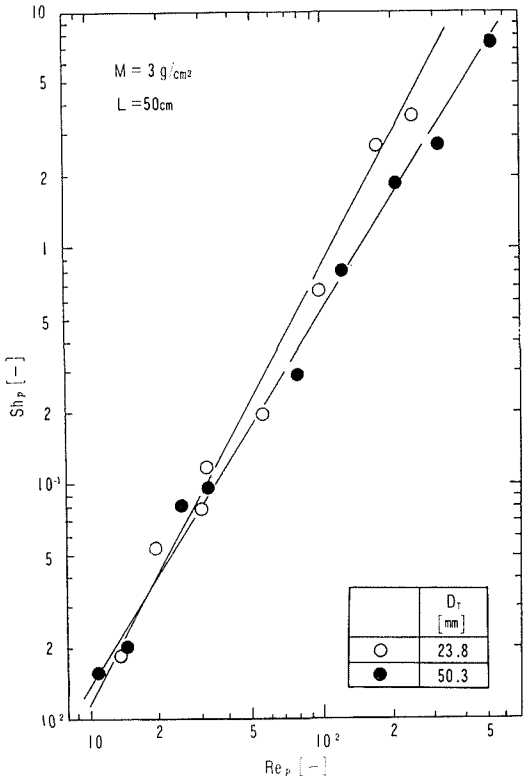

図18　Re_p と Sh_p

4.3.2 流動層との比較

流動層における Kettenring ら[2] の実験式 (6) を本実験の結果と比較するために，**図 9** に破線で示すと，流動層の方が一桁高い値を示した。この実験は塔径が 58 mm，粒径が 14–48 mesh の範囲で行なわれたもので，本実験の条件にほぼ等しい。この流動層における空気流速を u/u_t に換算すると 0.2 前後の値となっており，われわれの浮遊層の 1/3 程度である。すなわち層を通過する空気の単位量当りについての物質移動量を考えるなら，われわれの浮遊層でも浮遊状態を良好に保つことによって，流動層の 1/2 程度の気固の接触効率が得られることがわかった。Richardson ら[4] の (8) 式は Re_p の依存性が少く，Sh_p の値は本実験よりはるかに大きな値となっていた。

4.4 円筒型浮遊層の発展性

これまでの粒子挙動，物質移動の両面の検討から，円筒型浮遊層はその形状から来る欠点が明らかとなった。すなわち浮遊量 M は 3 g/cm² 程度が最適であるため，塔径を増大して処理量を増すことは，流動状態が悪化して，D_T/d_p の小さい方が望ましい結果となっており，特に D_T=20–30 mm で最大の k_G を示したことは，スケールアップの一大障害である。これは浮遊層は壁効果を最大に利用するように考えたため，塔径の増大が層の吹き抜けにつながっているためである。壁効果を最大限に利用するためには，同心円多重管としてその間隔を 20–30 mm に保つか，大口径管中に 20–30 mm の小口径管を多数挿入して，塔内の相当直径を 20–30 mm 程度におさえるかの方法がある。後者の方式については Volk ら[6] が流動層中に直径 4.8 cm の棒を挿入して，層の相当直径を小さくし，反応率の向上をはかった例がみられる。これは流動層中の気泡の生成を抑制する働きを持たせたものであった。しかしこれらは装置を複雑化するため，浮遊層の将来のスケールアップのためには得策ではない。これに代るものとして，箱型の外枠槽の中へ適当間隔の平行仕切板を多数挿入した箱型狭間隔浮遊層を開発することにした。

5. ま と め

円筒型浮遊層を反応管へ応用するための基礎実験の一つとして，恒率乾燥実験における物質移動係数 k_G を測定して，浮遊層の接触効率について検討を加えた。浮遊層に影響を及ぼす因子として，浮遊量 M，空気流速比 u/u_t，塔径 D_T，粒子径 d_p，浮遊層高 L，静止層高 L_0 を考えた。この時，浮遊層を形成する空気流速 $u/u_t=0.7$–0.8 が最適とみなされ，浮遊量 M は 3 g/cm² が適当しており，この条件を中心に他の因子について検討を加えた。すなわち，(1) 浮遊量と空気流速比を一定とした時，(2) 静止層高／塔径＝1 とし，空気流速比を一定とした時，(3) 浮遊層高が一定となる空気流速比で浮遊した時について検討した。いづれも $Sh_p=k_Gd_p/D_G$ は d_p の 3 乗に比例すること，すなわち物質移動係数 k_G は d_p の 2 乗に比例することが認められた。さらに $Sh_p\propto Re_p^{1.5}$ がいづれも認められた。また D_T による影響では $D_T=20$–30 mm で最大の Sh_p を示す傾向が認められた。

次元解析により相関式を導出して検討したところ，$L_0/D_T=1$ ならびに L が一定となるように浮遊化したときの両者に適用されて，次の実験式で整理された。

$$Sh_p=3.0\times10^4\ Re_p^{1.5}Ga^{0.5}(Mu/\mu)^{-1.25} \tag{18}$$

ただし $10<Re_p<600$，$M<5$

これらのことから円筒型浮遊層は塔径増大によるスケールアップは出来ず，同心円多重管型か大口径管中に小口径管を多数挿入した型が考えられる。これに対し箱型の外枠槽内へ適当な間隔を持つ平行仕切板を持つ箱型狭間隔浮遊層を考えた。外枠槽の大きさおよび平行仕切板の数の増大は容易であると考えられるので，引続き箱型浮遊層の開発を企図した。

使 用 記 号

A: 塔断面積 [cm²]
a: 比表面積 [cm²/cm³]
C: 空気水分濃度 [g/cm³]
C_s: 粒子上の空気水分飽和濃度 [g/cm³]
D_G: 空気中の水蒸気の拡散係数 [cm²/sec]
D_T: 塔径 [mm]
d_p: 粒子径 [mm]
Ga: ガリレイ数 ($=d_p^3g\rho_g^2/\mu^2$) [—]
H: 空気湿度 [g/g]
h_p: 伝熱係数 [kcal/cm² °C sec]
k_G: 物質移動係数 [cm/sec]
L: 浮遊層高 [cm]
L_0: 静止層高 [cm]
M: 浮遊量 [g/cm²]
M'_D: 乾量基準浮遊量 [g]
N: 水の移動量 [g/sec]
N': 含水率変化量 [1/sec]
Re_p: レイノルズ数 ($=d_pu\rho_g/\mu$) [—]
Sc: シュミット数 ($=\mu/\rho_gD_G$) [—]

Sh_p：シヤーウッド数 $(=k_G d_p/D_G)$ [—]
T：ガス（空気）温度 [°C]
u：ガス（空気）流速 [cm/sec]
u_t：粒子終端速度 [cm/sec]
V：浮遊層容積 [cm³]
W：粒子含水率 [g/g]
W_c：粒子限界含水率 [g/g]
ε_0：静止層空隙率 [—]
ε：空隙率 [—]
θ：時間 [sec]
μ：ガス（空気）粘度 [g/cm sec]
ρ_g：ガス（空気）密度 [g/cm³]
ρ_s：粒子密度 [g/cm³]
ϕ：形状係数 [—]

添字

0：初期　　D：乾球
1：入口　　W：湿球
2：出口

文　　献

1) 藤川，久郷他：北大工学部研究報告，No. 64, p.71 (1972).
2) Kettenring, K. N., E. L. Manderfierd and J. M. Smith: Chem. Eng. Prog., **46** 139 (1950).
3) 若尾：化学工学，**29** 922 (1965).
4) Richardson, J. F. and J. Szekely: Trans. Inst. Chem. Eng. (London), **39** 212 (1961).
5) Heertijes, P. M.: Can. J. Chem. Eng., **40** 105 (1962).
6) Volk, W., *et al.*: Chem. Eng. Prog., **58**, No. 3, 44 (1962).