HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	充填層における吸着速度について
Author(s)	佐藤, 忠正; 藤川, 昌久; 佐々木, 孔一
Citation	北海道大學工學部研究報告, 20, 1-24
Issue Date	1958-12-18
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40652
Type	departmental bulletin paper
File Information	20_1-24.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

充塡層における吸着速度について

佐藤忠正*
藤川昌久
佐々木孔一

(昭和33年9月30日受理)

Rate of Adsorption in the Fixed Bed

Tadamasa SATO
Masahisa FUJIKAWA
Koichi SASAKI

Abstract

The rate of adsorption in the fixed-bed of silicagel-water-air system was measured to study on the masstransfer mechanism of adsorption, which contains converted parameters of gas velocity G, particle diameter of adsorbent d_p, initial concentration of inlet gas C_0 and hight of packed adsorbent Z.

Assuming that the adsorption zone moves along the fixed bed of adsorbent with a constant speed while keeping a constant hight, the over-all coefficients of masstransfer K_fa were calculated from the results obtained by experiments. The value of K_fa is observed not to be of constance depending apon d_p as well as C_0. According to the idea of two film resistances, K_fa is divided to the inner and outer film coefficients of the particle surface. The gas film coefficient k_f is observed to be a function of modified Reynolds number $(Re)_{\mathrm{mod}}$ and an idea of the solid film in the particle surface or critical solid zone being plausible, the solid film coefficient k_s is empirically shown to be a function of C_0 and specific adsorption q/q_0. However, the porocity ε, gas film diffusion coefficient D_f and d_p are observed being related to the both film coefficients in spite of assume in the existence of two films.

As the conclusion of this work, the coefficient K_fa is expressed as follow:

$$\frac{D_f(1-\varepsilon)}{K_fa\,d_p^2} = 0.64\,(Re)_{\mathrm{mod}}^{-0.35} + \frac{m\xi}{\gamma(q/q_0)}$$

where

$$\xi = \beta D_f/D_s = 0.124\ (1-10^{-3.5\,C/C_0}) \qquad C_0 < 0.005$$
$$= 2050\,C_0^{1.4}\ (1-10^{-3.5\,C/C_0}) \qquad C_0 > 0.005$$

* 現在日本合成ゴム株式会社勤務

1. 緒　　論

吸着操作は従来よりガスの乾燥，溶剤の回収，溶液の精製等に利用され，近時更に石油溜分の分離，類似化合物の精密分離，Hypersorption によるガスの分離等に利用されるに至つて単位操作として重要視されて来ている。しかるに吸着剤は固体であるために，ガス吸収や液々抽出の如き連続向流操作を行うには高度の技術を要するので，操作は充填層を用いて行われることが多い。

従つて充填層を用いて吸着操作を行う場合や，吸着塔を設計する場合には吸着塔の容量や操作時間に対して全て流体から固体への被吸着質の物質移動速度が関係してくる。従つて充填層における吸着の問題は充填層における物質移動に帰することが出来る。

2. 充填層による吸着

2.1 吸着平衡

多くの場合固体上のガス又は蒸気の吸着平衡特性は，液体へのガスの溶解平衡と類似している。固体上の吸着ガスの濃度は一定温度においてガスの平衡濃度に対して点綴される。充填層の吸着平衡は同様に考えてよいが，吸着剤の粒径により単位充填量当りの吸着活性面積が異なるため，粒径により吸着平衡曲線に相違があると考えられる。温度による影響はガスの溶解と同様に当然に考慮しなければならず，各温度に対する吸着平衡曲線が得られる。

2.2 充填吸着層における物質移動について

充填層吸着における物質移動は次の順序により生ずると考えられる。

i) 吸着剤周囲の境膜中での拡散

ii) 吸着剤粒子内部の拡散

iii) 吸着面における吸着反応

このうちいずれかが律速段階になつており，それは吸着剤，被吸着物質の種類，操作条件によつて異なるものであるが，(iii) の速度は (i)(ii) に比して小さいと考えられるので，[10] (i)(ii) の両者，又はそのいづれかが律速段階となつている。

次に充填層内における被吸着質の拡散方向は充填塔の半径方向への拡散が主であるが，同時に流れの方向への拡散も考えられる。これは Hiester 等[13] によれば $(Re)\cdot(Sc)<10$ の時には無視出来ないとしているが，平衡が常に成立して $q=f(C)$ の関係で表わせると，通常の工業的操作条件にては無視し得るものと考えられている。[4),14)] すると数学的に濃度，時間，充填層の高さの関係が簡単な式で表し得る。[2)] この外 (i) が律速のとき，[1),4),7),8)] (ii) が律速のとき，[6),9),12)] (i)(ii) の両者が律速のとき[9),12)] 等の限られた条件について数学的に解析が行われているが，これらは平衡曲線が簡単な式で表わされる時に限られ，又得られた結果は複雑である。

2.3　吸着における物質移動係数について

こうした問題を解くとき物質移動係数を用いると便利であるが，これを用いて数学的に解析する時には或る条件にては一定のものとして用いているので，実際と一致せず，又屢移動係数は一定のものでないことが多い。しかし実用上総括容量係数の形で用いると非常に便利である。実際，充填した吸着物の比表面積を実測することが多大の困難を伴なうことは他の例にても我々は経験する処であるので，これと物質移動係数を含めて総括容量係数として物質移動を取扱うと解決が容易である。

この様に物質移動係数は吸着速度を決定する重要な因子であるが，今総括容量係数 K_fa を用いて吸着速度式を表すと次の如くに表わされる。

$$\gamma \frac{dq}{d\theta} = K_fa(C-C^{*}) \qquad (1)$$

ここに K_fa がガスの流速，初濃度，吸着剤粒径等により変化するとすれば，K_fa とこれら因子の関係を求めることが吸着を解明する一手段となる。

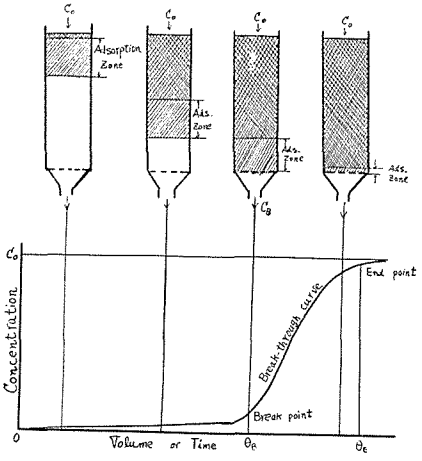
次に，物質移動係数を更に (a) ガス境膜内の物質移動係数 k_f と (b) 固体粒子内の物質移動係数 k_s に分けて考え，各々の容量係数を k_fa，k_sa とするならば，一般に

$$\frac{1}{K_fa} = \frac{1}{k_fa} + \frac{m}{\sigma k_sa} \qquad (2)$$

の関係が成立すると考えてよい。(a) については $J=aRe^{n}$ の関係が広く認められており，かなり簡単な関係が得られるものと考えられる。(b) については余り研究はなく，Eaglton[3] が近似的に求めているに過ぎない。ガス吸着の場合には多くは粒子外境膜物質移動速度が律速段階であると考えられいるが実際には粒子内境膜物質移動速度の影響も無視出来ない。[5]　このためこの研究は吸着における各物質移動係数に及ぼす諸因子の影響を検討してみた。

2.4　破過曲線と吸着帯

充填層中を被吸着質を含むガスが連続的に流れている時を考えよう。最初に入るガスに接触している吸着剤は急速且つ有効に吸着するのでガス中に残る被吸着質は殆んどなく，次に続く充填層中を流れるガスは殆んど被吸着質を含んでいない。それ故充填層中の被吸着質の分布は第1図の如く変化し，一端より順次飽和している。更にこの時の流出液の濃度は初めは殆んど0であるが，終端が飽和され始めると急激に上昇し始める。この点を漏出点 Break point と云う。やがて全体が飽和されるに及んで流出ガスは最初入つた濃度に殆んど等しくなる。この点を終点 End point と云



第1図　破過曲線と吸着帯

う。このように流出ガス量と濃度の関係曲線を破過曲線 Break-through curve と云う。又，一定量流れているとすると流出ガス量の代りに時間をとつても同じである。若しガスが更に連続して流れると，充填層は遂に供給ガスと平衡してしまうので，それ以上の吸着は起らない。

破過曲線の形状及び存在の時間は大いに充填層吸着の操作法に影響し，吸着過程が無限に速いなら破過曲線は垂直となるだろう。実際の吸着過程の速度並びに機構，吸着平衡の性質，流速，供給ガスの被吸着濃度及び充填層の高さが破過曲線を決定する。

この吸着過程において，実際の吸着は漏出点から終点の間の比較的狭い間で行われると考え，これを吸着帯 adsorption zone と云う。破過曲線上で傾斜している部分である。今測定した破過曲線で充填高さが変化しても一定傾斜を示していると，他の操作条件が一定なら吸着帯は一定の巾で且つ一定速度で層内を移動することが明らかにされており，Wicke[14] によると平衡曲線が曲線の場合は充填層内の濃度分布は初めのうちは一定でないが，次第に一定の濃度分布で層内を移動することが示されている。この考え方は固体の乾燥，イオン交換等の他の操作においても認められている。

吸着帯の巾が一定で充填層の高さが吸着帯の巾より大きい時に，即ち比較的稀薄なガスからの吸着において吸着平衡曲線が溶液濃度の軸に凹の場合には，吸着帯の巾は次の式を用いて求めることが出来る。[11]

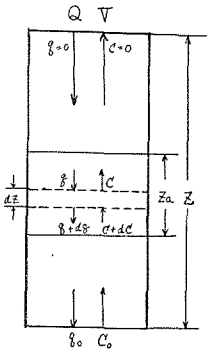
$$z_a = \frac{z\theta_a}{\theta_E-(1-f)\theta_a} \qquad (3)$$

ここに

$$f = \frac{\int_{y_B}^{y_E}(1-y)\,dy}{y_E-y_B}, \qquad \theta_a = \theta_E-\theta_B$$

2.5　総括容量係数の求め方

充填層中での吸着帯は実際に我々が認めるように吸着剤中を移動している。この時逆に吸着剤が適当な速度でガスと向流に塔の中を移動しており，吸着帯が塔中の同位置に留るものと考えよう。ここに塔より出る吸着剤は入つてくるガスと平衡し，全ての被吸着質は流出ガスで回収されるものとする。すると他の連続向流操作と同様に考察することが出来る。即ち第2図の如くに考えると送入吸着剤に吸着される被吸着質の濃度が0の場合は吸着帯の巾 z_a より充填層の高さが大きければ $C=0$ であるから，塔全体の物質収支より



第 2 図
吸着塔の物質移動

$$VC_0 = Qq_0 \qquad (4)$$

任意断面と流体入口との間では

$$V(C_0-C) = Q(q_0-q) \qquad (5)$$

微小高さ dz なる部分で単位時間に吸着される量は

$$-VdC = K_f a (C-C^*) S dz \tag{6}$$

(6) 式を C_0S で割つて

$$-udy = K_f a (y-y^*) dz \tag{7}$$

$u = V/S$: 線速度, $y = C/C_0$: ガスの濃度

(7) 式より

$$\frac{dy}{y-y^*} = \frac{K_f a}{u} dz \tag{8}$$

両辺を積分すると

$$\int \frac{1}{y-y^*} dy = \frac{K_f a}{u} \Delta z \tag{9}$$

以上を固定層に戻してみると各濃度の相対的な位置は常に変らず，従つて吸着帯の移動速度は連続向流塔の吸着剤の移動速度に等しい。

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{Q}{S\gamma} \tag{10}$$

(4) 式を (10) 式に代入すると

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{uC_0}{\gamma q_0} = \frac{u}{\gamma \sigma} \tag{11}$$

$$\sigma = q_0/C_0$$

或る点 z_1 の濃度が y_1 であるとき，時間 $\Delta\theta$ の後には $(z_1 - dz/d\theta)\,\Delta\theta$ の点の濃度 y_2 がくるから

$$\int_{y_1}^{y_2} \frac{1}{y-y^*} dz = \frac{K_f a}{u} \left(\frac{dz}{d\theta}\right) \Delta\theta = \frac{K_f a}{\gamma\sigma} (\theta_2 - \theta_1) \tag{12}$$

となり続括容量係数は (12) 式と平衡曲線及び実験より得られる破過曲線より求められる。

又 (5) 式を (4) 式で割ると

$$(1-C/C_0) = (1-q/q_0)$$

$$C/C_0 = q/q_0 \tag{13}$$

$$y = x$$

(13) 式は操作線の式となり平衡曲線が簡単な式で表すことが出来ると $\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{y-y^*}$ は数学的に積分出来るが，実際には出来ないことが多いので図積分によつて求めることが多い。

3. 実験装置と方法

3.1 実験条件

実験の条件は次の通りである。

実験試料

吸着剤: シリカゲル (小宗化学製 1 級試薬) 140～150°C にて 7～8 hr 乾燥して使用。

平均粒径は3種で各1.05 mm, 1.82 mm, 3.27 mm. 比重は1.68。

被吸着物：　水

同伴ガス：　空　　気

吸着温度：　30°C const

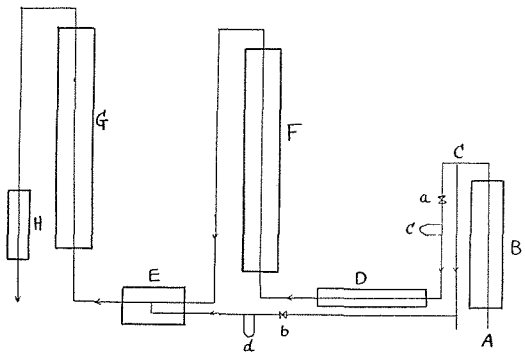
ガス濃度：　0.1～1.0%

ガス流速：　0.7～7.0 ℓ/min

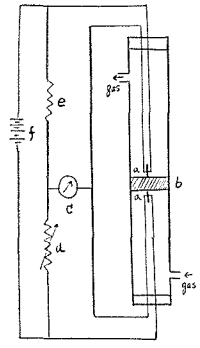
充填高さ：　5～60 cm

3.2 実験装置

実験装置のフローシートを第3図に示す。Aは空気の入口で，Bは空気乾燥塔で，空気を完全乾燥させるため乾燥シリカゲル管3本を直列に通す。Cで空気を2分し，Dは予熱器で30°Cに予熱する。Fは飽和器で内径約30 mm, 高さ600 mmのガラス管の中へ外径6 mm，内径3 mm，高さ7～10 mmのガラス管片を約50 cm充填し，これに温水ジャケットを付す。この中へ上より30°Cの温水を約200 cc/min流下させ，ここへ予熱器Dで30°Cに予熱した空気を送り込んで飽和させ，湿り空気とする。この時約1時間後に0.0402 ℓH_2O/ℓ dry airとなつて一定した。Eは混合槽を兼ねたヒーター，c, dは流量測定のためのガラス製オリフィス計で検定して用いた。Gは吸着塔で内径20 mm，高さ960 mmのガラス管でこの中へシリカゲル試料を充填し，恒温操作のための温水ジャケットをつけている。Hは水分測定器で水分の測定は第4図の如くサーミスターを用いて，水とカーバイトの反応熱による温度上昇のため生ずる抵抗減少をブリッジ回路を用いて測つた。



第3図　実験装置フローシート

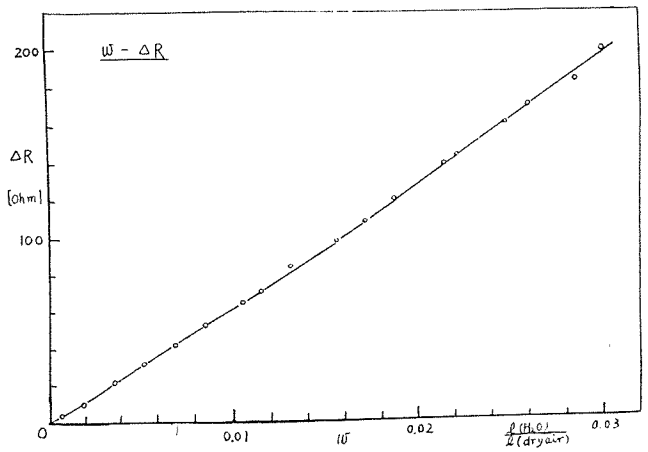


第4図　水分検定器

サーミスターは4000 Ω(25°C), 温度係数 −0.046 ohm/°Cのもので，可変抵抗は3000 Ω，固定抵抗は2000 Ωのものを用いた。水分と抵抗変化は第5図の如く殆んど直線的関係になつている。

a　サーミスタ　　b　カーバイト層　　c　電流計　　d　可変抵抗

e　固定抵抗　　f　電　　池



第5図 ガス水分濃度一抵抗変化

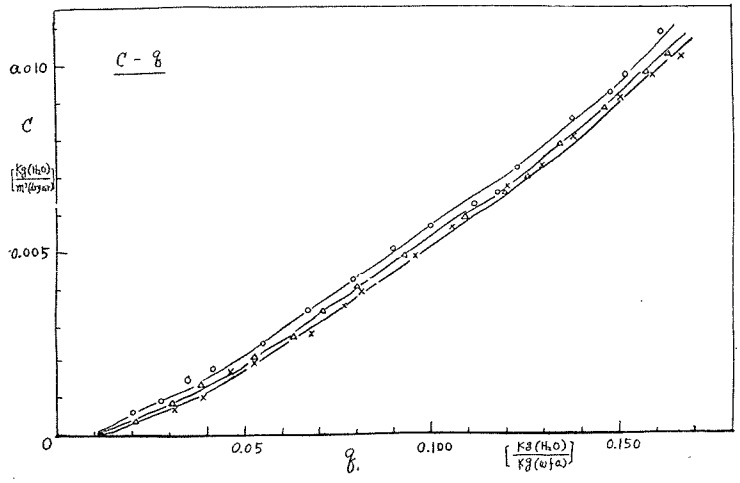
3.3 実験方法

Aより入つた空気は乾燥塔で完全乾燥後2分され，1部はaのコックで調節し，cのオリフィスで流量を測定して予熱器へ送り，更に水分飽和器で飽和して加熱器へ入る。他の1部はそのままコックbで流量調節して加熱器へ送り混合させる。この時両者の流量を調節して必要とする水分濃度及び流量の混合ガス試料とする。この試料を吸着塔に送つて必要条件の吸着実験を行い，各時間ごとに流出ガス水分濃度を水分検定器にて測定記録する。

4. 実験結果

4.1 平衡曲線

平衡曲線は吸着剤 15～20 g 充填した吸着塔へ湿度を調節した空気を毎分5ℓ送り，入口と出口の濃度が等しくなる迄送つた後に測定したものである。即ち2～3時間で殆んど等しく



第6図 平衡曲線

第1表 実 験 結 果 (破過曲線データ)

Exp. No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d_p		0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182
G		181	260	352	492	723	987	1190	1450	1450	1670	178	251	354	494
C_0		0.00239	0.00243	0.00241	0.00241	0.00241	0.00241	0.00241	0.00243	0.00243	0.00247	0.00241	0.00241	0.00241	0.00241
q_0		0.0533	0.0541	0.0539	0.0539	0.0537	0.0539	0.0539	0.0541	0.0541	0.0547	0.0582	0.0582	0.0582	0.0582
$\sigma=q_0/C_0$		22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.1	24.0	24.0	23.9	23.9
W		0.0172	0.0282	0.0432	0.0483	0.0623	0.0664	0.0636	0.0833	0.0833	0.0753	0.0157	0.0157	0.0346	0.0334
z		0.051	0.092	0.150	0.176	0.225	0.241	0 220	0.307	0.307	0.275	0.047	0.047	0.115	0.107
τ		1040	1000	901	856	865	860	905	848	848	856	1046	994	941	976
ε		0.376	0.416	0.463	0.489	0.483	0.487	0.460	0.494	0.494	0.489	0.425	0.425	0.438	0.418
	y														
θ	0.05	266.4	404.4	506.0	383.8	310.8	248.2	177.4	214.8	214.8	147.3	433.1	370.5	509.7	332.5
	0.15	338.4	460.6	552.3	423.5	348.1	279.8	210.5	244.6	244.6	175.6	455.4	390.9	526.3	348.0
	0.25	384.3	496.9	583.4	449.4	374.2	302.9	232.6	265.3	265.3	195.8	468.9	402.7	536.3	357.8
	0.35	423.4	527.8	610.5	472.6	395.9	323.5	253.5	283.9	283.9	214.1	480.1	412.5	544.9	365.5
	0.45	461.7	553.2	637.8	496.3	418.5	344.4	274.4	302.7	302.7	232.4	501.8	422.2	553.1	373.2
	0.55	502.0	591.0	666.0	522.1	444.0	367.0	297.0	323.2	323.1	253.2	514.7	432.3	561.8	381.2
	0.65	547.5	628.0	699.0	550.4	481.2	392.6	319.8	246.4	346.4	275.3	531.4	444.0	570.7	390.7
	0.75	603.7	673.5	739.8	585.6	516.0	424.2	352.5	374.5	374.5	304.4	554.5	458.9	580.9	403.3
	0.85	667.5	735.1	782.9	630.9	559.9	465.8	393.4	412.6	412.6	348.4	599.2	479.3	599.3	420.0
	0.95	824.5	852.0	893.8	725.3	632.0	551.1	478.3	490.2	490.2	418.7	642.9	519.6	636.8	452.8

第 1 表 (続 き)

Exp. No.		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
d_p		0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.00182	0.00105	0.00105	0.00105	0.00105	0.00105	0.00105	0.00105	0.00182	0.00182
G		720	981	1190	1450	1650	199	240	354	484	723	976	1200	482	723
C_0		0.00240	0.00240	0.00241	0.00241	0.00248	0.0241	0.00241	0.00241	0.00241	0.00241	0.00241	0.00241	0.00160	0.00159
q_0		0.0578	0.0582	0.0532	0.0581	0.0592	0.0607	0.0609	0.0609	0.0609	0.0609	0.0609	0.0609	0.0443	0.0441
$\sigma=q_0/C_0$		24.1	23.9	23.9	23.9	23.9	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	25.2	27.6	27.7
W		0.0346	0.0540	0.0523	0.0568	0.0355	0.0490	0.0181	0.0347	0.0233	0.0346	0.0570	0.0513	0.0368	0.0470
z		0.125	0.187	0.174	0.200	0.188	0.149	0.059	0.113	0.073	0.114	0.196	0.181	0.129	0.172
r		860	903	938	927	968	952	963	959	996	947	908	895	899	864
ε		0.482	0.440	0.418	0.425	0.471	0.433	0.427	0.428	0.406	0.437	0.458	0.471	0.469	0.484
	y														
θ	0.05	236.0	283.0	229.1	189.1	160.6	427.3	432.5	576.4	272.3	270.8	305.3	245.3	511.8	383.5
	0.15	248.5	295.5	241.0	200.3	171.0	436.2	439.6	582.9	278.3	276.0	309.7	249.4	527.7	397.2
	0.25	256.2	303.2	248.0	207.5	177.7	440.8	443.8	586.9	281.9	279.2	312.6	252.0	538.8	406.0
	0.35	262.3	309.8	254.9	213.7	183.2	444.4	447.2	590.1	285.0	281.8	314.9	254.1	546.3	414.0
	0.45	268.9	316.1	261.2	219.6	188.8	447.7	450.4	593.1	287.8	284.3	317.0	256.1	554.3	421.1
	0.55	275.0	322.9	267.9	225.8	195.0	451.2	453.2	596.2	290.8	286.9	319.2	258.1	562.6	428.2
	0.65	281.9	330.7	275.8	233.4	202.3	456.1	457.3	599.7	294.1	289.8	321.7	260.4	571.4	436.3
	0.75	291.8	340.8	286.0	243.3	211.6	461.1	462.0	604.2	297.5	293.5	324.9	263.5	582.3	445.9
	0.85	305.6	354.9	300.2	256.9	224.5	468.4	468.9	610.6	303.6	298.9	329.6	268.0	596.3	458.8
	0.95	332.0	381.3	328.1	283.5	249.7	482.3	481.9	622.9	314.9	309.2	338.9	276.5	624.7	485.5

第 1 表 (続 き)

Exp. No.		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
d_p		0.00182	0.00182	0.00327	0.00327	0.00327	0.00327	0.00182	0.00182	0.00182	0.00,182	0.00105	0.00105	0.00105	0.00182
G		976	1200	496	726	964	1220	487	731	962	1230	494	730	962	721
C_0		0.00159	0.00159	0.00432	0.00425	0.00417	0.00425	0.00429	0.00429	0.00427	0.00426	0.00426	0.00426	0.00427	0.00577
q_0		0.0441	0.0441	0.0825	0.0825	0.0813	0.0825	0.0874	0.0865	0.0871	0.0869	0.0894	0.0894	0.0897	0.109
$\sigma=q_0/C_0$		27.7	27.7	19.0	19.4	19.5	19.4	20.4	20.4	20.4	20.4	21.0	21.0	21.0	18.9
W		0.0562	0.0561	0.0486	0.0529	0.0685	0.100	0.0379	0.0540	0.0671	0.0670	0.0368	0.0539	0.0628	0.0586
z		0.209	0.209	0.174	0.192	0.256	0.370	0.143	0.180	0.231	0.223	0.144	0.208	0.219	0.214
r		841	840	874	862	837	813	829	938	908	939	838	801	898	856
ε		0.493	0.498	0.480	0.486	0.500	0.495	0.498	0.440	0.458	0.439	0.500	0.517	0.465	0.489
	y														
θ	0.05	341.7	275.3	305.7	212.9	217.5	298.4	328.8	319.9	366.1	233.5	378.6	349.5	316.3	330.1
	0.15	354.4	287.4	341.9	244.8	246.1	325.4	340.5	322.7	316.8	243.7	383.5	353.6	320.5	340.1
	0.25	362.7	295.5	364.0	266.3	264.9	343.8	347.9	340.4	323.6	250.4	386.2	356.0	323.1	347.3
	0.35	369.8	302.4	386.8	287.4	284.7	362.2	354.2	347.1	329.7	256.5	388.7	358.1	325.3	354.2
	0.45	376.6	308.9	411.0	311.3	306.1	381.9	361.1	354.0	336.6	262.9	391.1	360.2	327.4	361.0
	0.55	383.6	315.6	441.2	340.7	331.5	404.3	368.6	361.5	344.4	270.3	393.7	362.6	329.8	369.1
	0.65	390.9	322.9	474.9	374.1	360.0	430.1	377.4	371.0	353.5	279.9	396.8	365.5	332.6	378.6
	0.75	400.0	331.5	517.8	413.7	395.4	463.1	387.4	382.9	364.6	291.4	400.9	369.3	336.2	390.5
	0.85	412.2	343.1	571.2	465.7	444.1	505.0	402.9	398.9	380.0	307.6	406.5	374.5	341.2	408.7
	0.95	437.2	367.5	675.2	558.7	528.1	583.3	432.3	429.1	410.3	338.5	416.1	383.8	351.5	440.7

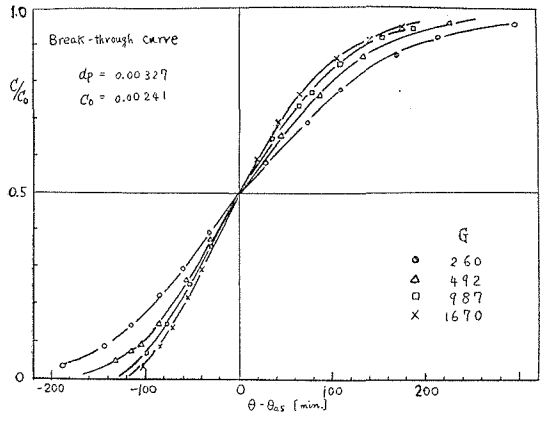
第 1 表 (続 き)

Exp. No.		43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	Unit
d_p		0.00182	0.00182	0.00,327	0.00327	0.00327	0.00182	0.00182	0.00182	0.00105	0.00105	0.00105	m
G		722	734	482	718	958	482	713	971	482	718	966	$kg/m^2\,hr$
C_0		0.00781	0.00872	0.0105	0.0105	0.0104	0.0105	0.0105	0.0105	0.0104	0.0104	0.0104	$\frac{kg\,(H_2O)}{m^3\,(dry\ air)}$
q_0		0.135	0.146	0.162	0.162	0.162	0.166	0.166	0.166	0.169	0.169	0.169	$\frac{kg\,(H_2O)}{kg\,(\omega.f.a)}$
$\sigma=q_0/C_0$		17.3	16.7	15.4	15.4	15.6	15.8	15.8	15.8	16.2	16.2	16.2	m^3/kg
W		0.0570	0.0574	0.0760	0.113	0.150	0.0560	0.0577	0.0563	0.0585	0.0568	0.0563	kg
z		0.209	0.208	0.296	0.420	0.554	0.203	0.210	0.206	0.229	0.210	0.221	m
r		853	861	797	841	833	863	859	854	799	845	796	—
ε		0.491	0.487	0.524	0.499	0.494	0.484	0.488	0.490	0.524	0.497	0 525	—
	y												
θ	0.05	275.7	258.5	323.7	306.3	355.3	350.3	225.0	154.0	443.8	274.8	198.7	min
	0.15	287.9	272.3	379.3	356.5	407.8	367.0	240.2	168.3	449.2	280.0	203.6	
	0.25	297.8	284.1	431.9	407.7	457.6	380.7	253.1	180.6	453.7	284.3	208.3	
	0.35	307.2	295.9	480.1	450.6	498.8	394.1	265.9	192.9	458.2	288.7	212.2	
	0.45	316.5	308.4	529.4	495.7	543.9	407.8	278.9	207.1	462.7	293.1	216.2	
	0.55	327.1	322.9	581.3	540.3	590.2	422.7	293.2	221.1	468.2	298.3	221.1	
	0.65	339.3	339.0	642.5	595.7	644.0	440.2	309.1	236.7	474.5	304.1	226.7	
	0.75	354.4	358.6	714.5	659.7	712.0	461.2	328.8	255.8	481.8	311.5	233.6	
	0.85	374.6	385.7	814.0	748.0	804.0	489.1	355.8	282.0	491.5	321.2	242.4	
	0.95	410.2	433.9	1000.0	920.0	973.0	545.9	409.1	333.6	511.3	337.9	259.8	

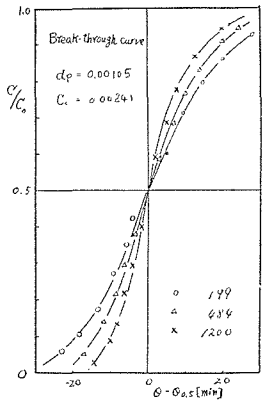
なつたが更にガスを送り6～7時間後の重量増加を測定して平衡値とした。結果は第6図の如くなつた。温度一定の下でやや凹んだ曲線であるが，粒径による差がみられる。これは単位重量当りの吸着表面積の差によるものと考えられる。

4.2 破過曲線

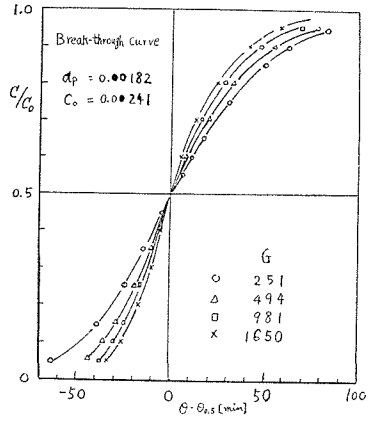
吸着操作実験結果は各条件における時間と流出濃度との関係が得られた。第1表に示す。これを図示すると破過曲線が得られるのであるが，これは粒径濃度，流速によつて変化するので比較するために初濃度と濃度との比，C/C_0 が0.5となる時間 $\theta_{0.5}$ と各濃度に対応する時間 θ との差を各々についてとつて，これと C/C_0 との関係をみた。結果は第7図の各図の如くになつた。第7-1～7-3図は C_0 を一定とした時，各粒径 d_p における流速の影響をみたもので，流速の大きい程破過曲線の傾斜が大きい。第7-4図は同一粒径，流速の時に初濃度の影響を比較したもので，C_0 の大きい程傾斜は小さくなる。第7-5図は流速，初濃度が一定のときに粒径による影響を比較したもので，明らかに粒径が大きくなると傾斜は小さくなつている。このこと



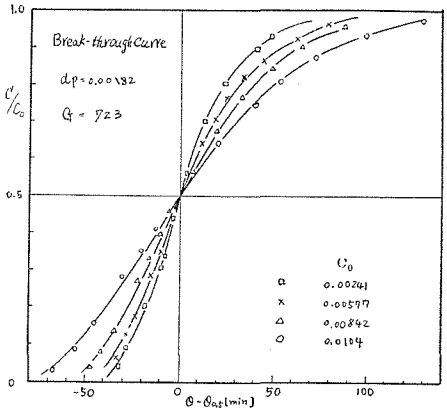
第7-1図　破過曲線 (1)



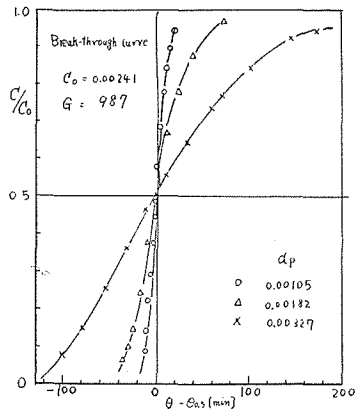
第7-2図　破過曲線 (2)



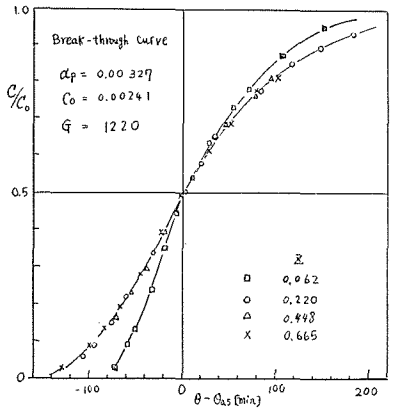
第7-3図　破過曲線 (3)



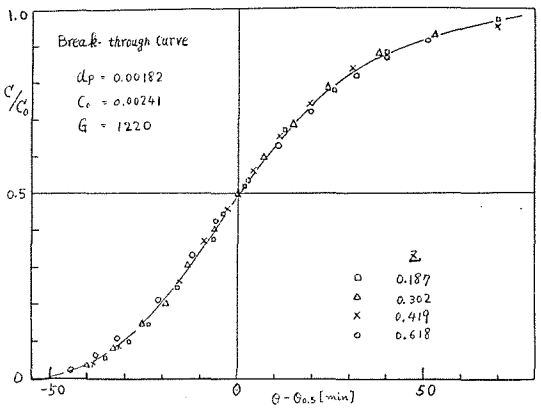
第7-4図　破過曲線 (4)



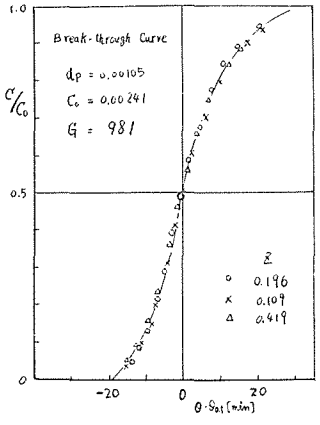
第7-5図 破過曲線 (5)



第7-6図 破過曲線 (6)



第7-7図 破過曲線 (7)

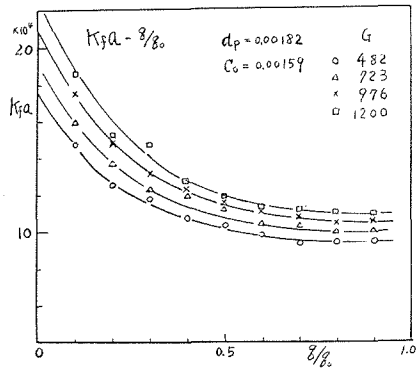


第7-8図 破過曲線 (8)

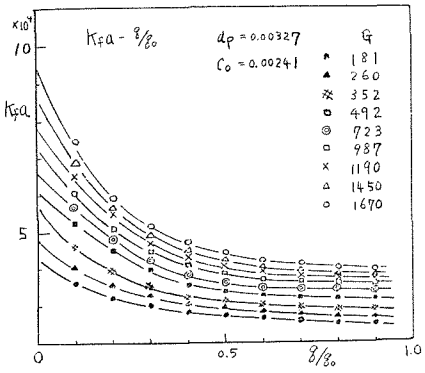
は第7-1～7-3図を比較しても認められる。第7-6～7-8図は充填層の高さを変えても，他の条件が一定なら高さが低過ぎない限り一定の傾斜を持つことを示している。第7-6図のうち充填高さ 0.062 m のものは z の小さすぎた為である。即ちこの条件では $z=10$ cm 以上になれば同一になると云える。

4.3 総括容量係数

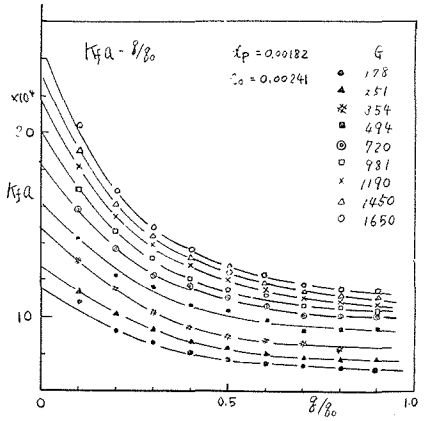
総括容量係数 K_fa は 2.5 の方法により第6図の平衡曲線と第7図の破過曲線から図積分により求めた。その結果を第8図の各図に示す。第8-1～8-7図は同一条件における流速の変化による K_fa の影響をみたもので，流速が大きくなると K_fa は大きくなり，比吸着量 q/q_0 が小さい時は流速の影響は比較的大きいが，q/q_0 が大きくなるにつれて流速の影響は大きくなる。又初濃度 C_0 が大きくなると流速の影響は全体として小さくなる。これらのことはこの移動速度に拡散抵抗が作用していることを示唆している。第8-6, 8-7図は同一 C_0 のときの粒径 d_p の影響を示したもので，粒径の影響は他の諸因子よりはるかに大きい。第8-8図は初濃度によ



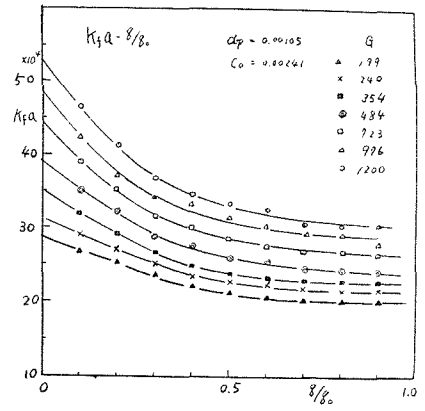
第 8-1 図　総括容量係数 (1)



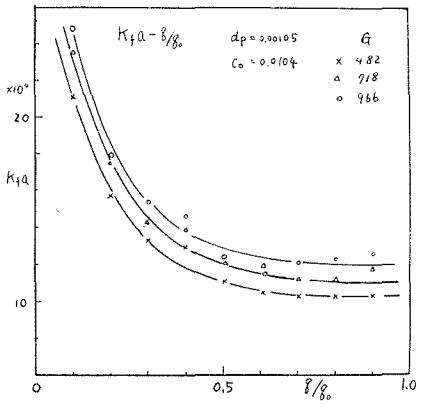
第 8-2 図　総括容量係数 (2)



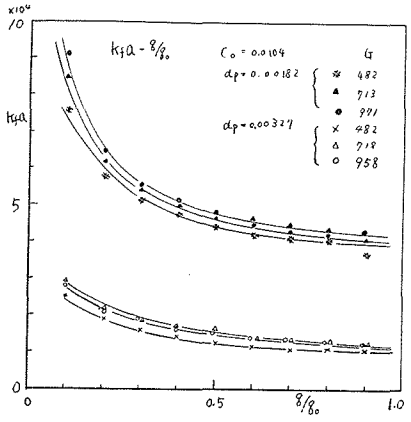
第 8-3 図　総括容量係数 (3)



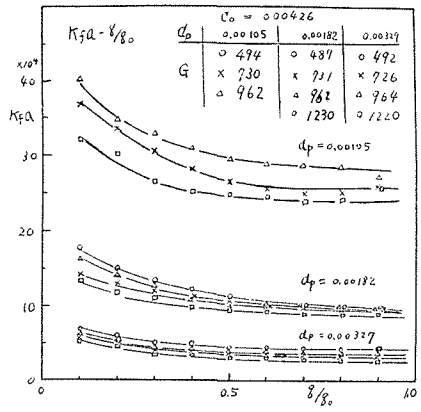
第 8-4 図　総括容量係数 (4)



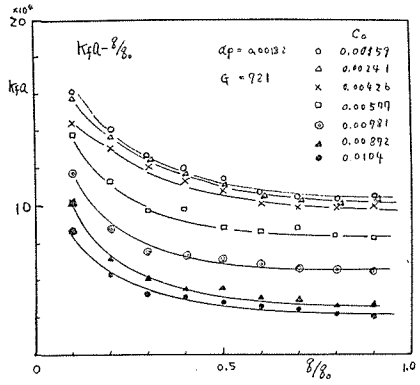
第 8-5 図　総括容量係数 (5)



第 8-6 図　総括容量係数 (6)



第8-7図　総括容量係数 (7)

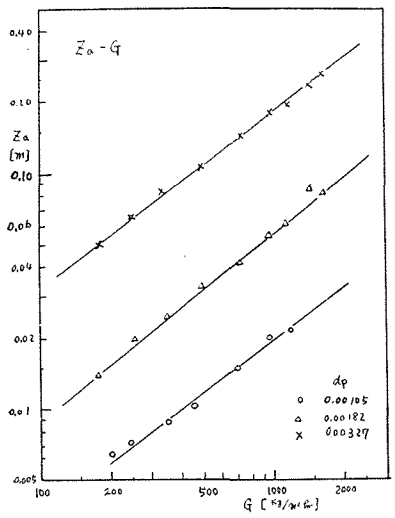


第8-8図　総括容量係数 (8)

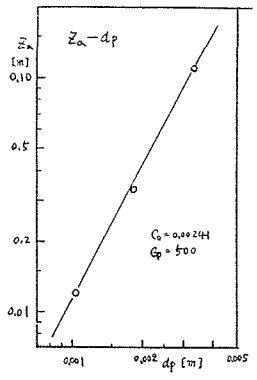
る影響を示したもので，C_0 が比較的小さい時は殆んど差はないが，C_0 の大になるにつれ K_fa は急激に小さくなる。即ち 0.005 kgH_2O/m^3(dry air)=0.4% 以下では C_0 による差はない。又全般に q/q_0 が小さい間は K_fa は大きいが，q/q_0 の大なるにつれ小さくなつている。この様に K_fa が C_0 及び q/q_0 により変化することはこの物質移動に固体内拡散抵抗が作用していることを示唆している。この様に K_fa は流速，粒径，初濃度，吸着剤の飽和度の函数であると共に，粒子内外の抵抗に分けて考えると良いことが分つた。次章で解析する。

4.4 吸　着　帯

吸着帯の巾 z_a は (3) 式により求められ，θ_B，θ_E は本来ならば $y=0$ 及び $y=1.0$ の θ の値をとるべきであるが，第1図の如く 0 及び 1.0 の値とはなつていないし，実際上測定し易い様に $y_B=0.05$，$y_E=0.95$ をとり，その相当する θ を夫々 θ_B，θ_E とした。これら結果をまとめて第9図の各図に示す。z_a と流速 G の関係は第9-1図の如くになり，$z_a=A'G^{0.85}$ の関係となつた。第9-2図は z_a と粒径 d_p の関係で $z_a=Bd_p^{2.0}$ の関係となつた。



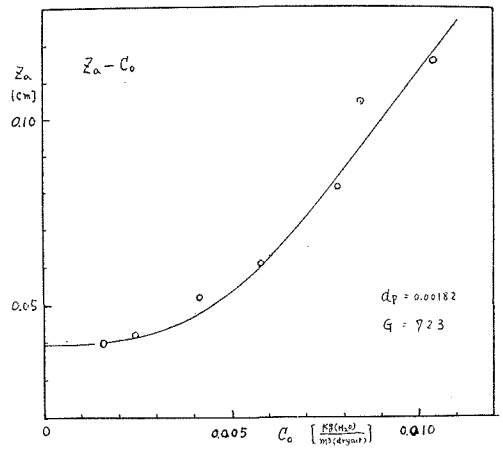
第9-1図　吸着帯の巾と流速



第9-2図　吸着帯の巾と粒径

又 z_a と初濃度 C_0 との関係は第9-3図の如くになつたが $C_0>0.003$ にて直線に近似すると $z_a=B'C_0^{2.4}+0.039$ の関係となつた。以上を考慮して本実験における z_a の実験式は次の様になつた。

$$z_a = 1150\,G^{0.85}\,d_p^{2.0}\,(8500\,C_0^{2.4}+0.039) \tag{14}$$



第9-3図　吸着帯の巾と初濃度

K_fa を求めた時 z が z_a より大きい時に成立する解き方を用いたが，上記の如くに z_a は z よりはるかに小さいので K_fa は正しい値と云えるが，又吸着帯が一定の巾で一定速度で層内を移動しているか否かは次により検定する。即河添[5]によると無次元項 $\eta=\dfrac{K_faz}{u}$ が4より大きい時，吸着帯は一定状態なることを示しているが，本実験における u と z_a 及び $\eta=4$ なる $z_{\eta=4}$ の関係をみると第2表の如く $z_{\eta=4}$ は z_a よりはるかに小さい。よつて吸着剤の充填高さが吸層帯の巾と同程度だと，吸層帯は定常状態で移動するとみなしてよい。

第2表　$\eta=4$ の時の z の値

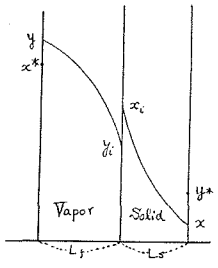
u	141	271	563	926	1290	196	383	746	m/hr
$K_a\times10^{-4}$	4.19	5.76	6.68	8.11	9.83	12.8	16.4	20.4	1/hr
z_a	5.0	8.3	14.4	19.8	26.8	2.0	3.3	5.5	cm
$z_{\eta=4}$	1.4	1.9	3.4	4.5	5.2	0.6	0.9	1.5	cm

5.　実験結果の解析

5.1　吸着剤粒子内外の境膜抵抗

実験結果から得られた様に吸着剤粒子内外に各々拡散抵抗が存在することが示唆されたが順次検討したい。

総括容量係数は一般に(2)式の様に表せると考えられるが，今便宜的に吸着剤表面内外に境膜抵抗を考える。粒外境膜抵抗は他の操作同様に境膜の厚さと考えることが出来るが，これと同様に粒内の拡散抵抗を粒内の拡散距離で表し便宜的に粒子内部に境膜が存在するものとして粒内境膜とする。すると第10図の様に被吸着質の濃度分布と吸着量の濃度分布が模型的に考えられる。この時吸着帯が充填層の一定位置に止り，吸着剤を一定速度で移動させると考えるとガス吸収の場合と同様に考えることが出来る。



第10図　境膜抵抗

今単位時間に被吸着質が粒外境膜を移動する量を N_f とすると

$$N_f = k_f a\,(C-C_i) \tag{15}$$

同様に粒内を移動する量を N_s とすると

$$N_s = k_s a\,(q_i-q) \tag{16}$$

定常状態においては $N_f=N_s$ より

$$k_f a\,(C-C_i) = k_s a\,(q_i-q) \tag{17}$$

$x=C/C_0$, $y=q/q_0$, $\sigma=q_0/C_0$ として

$$y-y_i = -\frac{k_s a}{k_f a}\,\sigma\,(x-x_i) \tag{18}$$

(18) 式で $-\frac{k_s a}{k_f a}\,\sigma$ は粒外境膜拡散速度が律速の場合は $k_f a$ に比較して $k_s a$ が非常に大きいと考えられるから，$-\frac{k_s a}{k_f a}\,\sigma=\infty$ と考えられる。又，粒内境膜拡散速度が律速の場合は $-\frac{k_s a}{k_f a}\,\sigma=0$ である。従つて x_i の変化する範囲は x から x^* の間であるから，平衡曲線の勾配として $x\sim x^*$ 間の平均値をとりこれを m とすると，

$$\begin{aligned} y-y^* &= \sigma\frac{k_s a}{k_f a}\,(x_i-x)+m(x_i-x) \\ &= \left(\sigma\frac{k_s a}{k_f a}+m\right)(x_i-x) \end{aligned} \tag{19}$$

よつて

$$\begin{aligned} K_f a\,(y-y^*)\,C_0 &= \left(\sigma\frac{k_s a}{k_f a}+m\right)(x_i-x)\,K_f a C_0 \\ &= k_s a\,(x_i-x)\,q_0 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\therefore\quad K_f a\left(\frac{k_s a}{k_f a}+m\right) = \sigma k_s a \tag{21}$$

$$\frac{1}{K_f a} = \frac{1}{k_f a}+\frac{m}{\sigma k_s a} \tag{2}$$

即ち前に出た (2) 式を得た。

5.2 粒外境膜

吸着量の少ない時に粒内の移動速度が無視出来るものとすると，$k_f a$ は $K_f a$ に等しくなるから，$K_f a$ と q/q_0 の図から曲線を $q/q_0=0$ の点に延長して求めた値 $(K_f a)_{q/q_0=0}=k_f a$ となる。今吸着剤を平均粒径 d_p を直径とする球体と仮定すると比表面積 a は次の様になるから

$$a = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \tag{22}$$

粒外境膜物質移動係数 k_f は

$$k_f = \left\{(K_f a)_{q/q_0=0}\right\}\frac{d_p}{6(1-\varepsilon)} = k_f a\,\frac{d_p}{6(1-\varepsilon)} \tag{23}$$

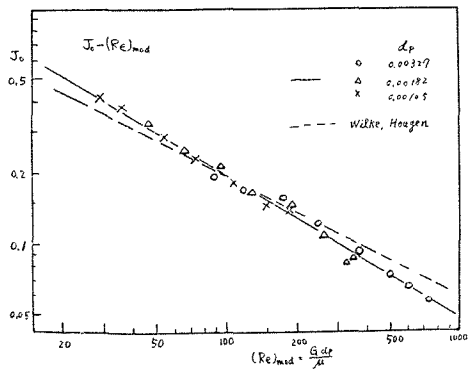
となつている。

次に k_f を用いて次式で J-因子を求める。

$$J_0 = \frac{k_f}{u}\left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^{2/3} = a\,(Re')^{m}_{\mathrm{mod}} \tag{24}$$

$$(Re')_{\mathrm{mod}} = Gd_p/\mu \tag{25}$$

この結果を第11図に示す。 Hougen 等[15] は水で濡らしたラシヒリングを充填した塔に空気を送り，水の蒸発量から水-空気系の境膜係数を求め，これを J-因子でまとめているが，この時の値はまつたく粒外境膜抵抗のみの値であるから我々の値と比較して第11図に示す。両者は約5% のずれがあるが，厳密には吸着と蒸発の相違，充填物形状の相違があるので大差はない。よつてわれわれの (23) 式の k_f は粒外境膜係数とみなして差支えない。



第11図　J 因子とレイノルズ数

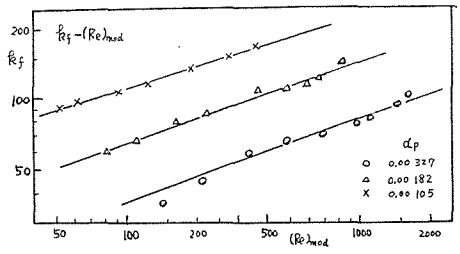
5.3　$k_f a$ の検討

今粒外境膜拡散係数 D_f を用いて粒外境膜を移動する量を表すと

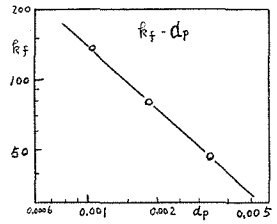
$$N_f = k_f a\,(C-C_i) = \frac{D_f}{L_f}\,a\,(C-C_i) \tag{26}$$

ここで L_f は粒外境膜の厚さを表すものとする。すると

$$k_f = \frac{D_f}{L_f} \tag{27}$$



第12-1図　粒外境膜移動係数とレイノルズ数



第12-2図　粒外境膜移動係数と粒径

この時 k_f と $(Re)_{\mathrm{mod}}$ との関係を求めると第12-1図の如くなつており，又 k_f と d_p の関係は第12-2図の通りで両図より一般に

$$k_f = a'\,(Re)^{m'}_{\mathrm{mod}}\,d_p^{-1} \tag{28}$$

となり (27), (28) 式より

$$\frac{L_f}{d_p} = a''\,(Re)^{-m'}_{\mathrm{mod}} \tag{29}$$

とおかれ L_f が Re に関係することを示す。(27), (29) 式より

$$k_f = a'''(Re)_{\mathrm{mod}}^{-m'} d_p^{-1} D_f \tag{30}$$

となつており，(22) 式を代入すると

$$k_f a = 6a'''D_f(Re)_{\mathrm{mod}}^{-m'} d_p^{-2}(1-\varepsilon) \tag{31}$$

となり一般に成立するものである。

5.4 粒内境膜—$k_s a$ の検討

5.3 と同様に粒内境膜拡散係数 D_s を用いて粒内境膜を移動する量を表すと

$$N_s = k_s a(q_i - q) = \frac{D_s}{L_s} a(q_i - q) \tag{32}$$

L_s は粒内境膜を仮定した時の厚さである。同様に

$$k_s = \frac{D_s}{L_s} \tag{33}$$

同様な考えで k_s は吸着量，ガス初濃度が一定であれば

$$k_s = \beta'\gamma d_p^{-1} \tag{34}$$

となり

$$\frac{L_s}{d_p} = \beta''\gamma \tag{35}$$

とおくことが出来る。よつて (33), (34) 式より

$$k_s = \beta'''\gamma D_s d_p^{-1} \tag{36}$$

として表わされ (22) 式を代入すると

$$k_s a = 6\beta'''\gamma D_s d_p^{-2}(1-\varepsilon) \tag{37}$$

となり一般に成立するものである。

5.5 総括容量係数の検討

今得られた (31), (37) 式を (2) 式に代入すると

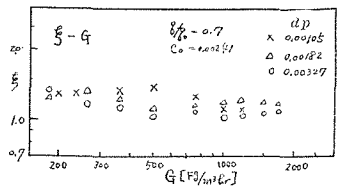
$$\frac{1}{K_f a} = \frac{1}{6a'''D_f(1-\varepsilon)}(Re)_{\mathrm{mod}}^{-m'} d_p^2 + \frac{m d_p^2}{6\beta'''D_s(1-\varepsilon)\sigma\gamma} \tag{38}$$

これを整理して

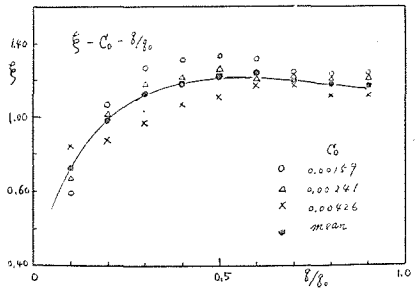
$$\frac{(1-\varepsilon)D_f}{K_f a d_p^2} = a(Re)_{\mathrm{mod}}^{n} + \frac{\beta m D_f}{\sigma\gamma D_s} \tag{39}$$

$$= a(Re)_{\mathrm{mod}}^{n} + \xi\frac{m}{\lambda}$$

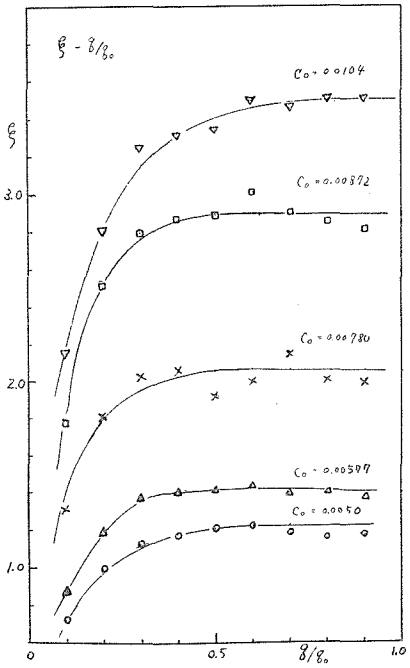
$$\xi = \frac{\beta D_f}{D_s}, \qquad \lambda = \sigma\gamma \tag{40}$$



第 13-1 図　ξ と流速



第 13-2 図　ξ と初濃度と比吸着度



第 13-3 図　ξ と初濃度と比吸着度

(39) 式によつて総括容量係数を流体の流れに関する因子と粒子内拡散に関する因子にまとめられた。a, n の値は第 12 図より求められ，m は平衡曲線の勾配故一定値となる。λ も或る系に対して一定値である。

ξ は D_f, D_s により定るが，D_f は被吸着剤とその同伴ガスにより定り，多く測定値があるので問題はないが，D_s は吸着量や C_0 によつて変化し，その測定も実験的に難かしい。そこで ξ に対する諸因子の影響を求めて第 13 図の各図に示す。流速，粒径による影響はなく，初濃度が 0.005 kg H_2O/m^3 dry air より小さい時は影響は余りないが，C_0 が大きい時には急増し，吸着量の影響は q/q_0 が小の時には ξ は小さいが 0.5 より大になると一定値に近づく。よつて ξ を実験式で表すと

$$\left.\begin{aligned} \xi &= 0.124\,(1-10^{-3.5x}) \qquad C_0 < 0.005 \\ \xi &= 2050\,C_0^{1.4}\,(1-10^{-3.5x}) \qquad C_0 > 0.005 \end{aligned}\right\} \tag{41}$$

となつた。

以上のことから K_fa は次の式によつて表すとよい。

$$\frac{(1-\varepsilon)D_f}{K_fad_p^2} = 0.64\,(Re)_{\mathrm{mod}}^{-0.35} + \frac{m\xi}{\gamma\sigma} \tag{42}$$

第3表 K_fa の実測値と計算値

	q/q_0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90
$C_0=0.00159$, $G=723$	K_fa 実測値	16.0×10^4	13.7×10^4	12.2×10^4	11.4×10^4	10.5×10^4	10.3×10^4	10.3×10^4	10.1×10^4	10.2×10^4
$d_p=0.00182$, $\varepsilon=0.484$	〃 計算値	15.4	13.4	12.5	11.6	10.9	10.3	9.74	9.74	9.74
	誤差 %	3.7	2.2	2.5	1.8	3.8	0	5.8	2.7	4.7
$C_0=0.00241$, $G=1190$	K_fa 実測値	6.5	5.58	4.66	4.33	4.1	3.96	3.79	3.79	3.79
$d_p=0.00327$, $\varepsilon=0.460$	〃 計算値	6.32	5.49	4.82	4.37	4.15	3.88	3.78	3.67	3.73
	誤差 %	4.5	1.6	3.3	0.9	1.2	2.1	0.3	2.1	1.6
$C_0=0.00241$, $G=723$	K_fa 実測値	39.0	35.0	31.8	29.6	28.2	27.2	26.7	26.4	26.1
$d_p=0.00105$, $\varepsilon=0.437$	〃 計算値	42.0	37.2	34.3	31.4	30.2	28.7	28.1	27.4	27.4
	誤差 %	7.7	6.3	7.3	6.1	7.1	5.5	5.2	3 8	5.0
$C_0=0.00241$, $G=981$	K_fa 実測値	17.7	14.6	13.1	12.2	11.4	11.2	10.8	10.5	10.4
$d_p=0.00182$, $\varepsilon=0.440$	〃 計算値	17.6	15.4	13.5	12.4	11.7	10.9	10.6	10.6	10.6
	誤差 %	3.5	5.5	3.0	1.6	2.6	2.7	1.9	1.0	1.9
$C_0=0.00426$, $G=962$	K_fa 実測値	16.4	14.1	12.7	10.8	10.1	10.1	10.3	9.99	9.62
$d_p=0.00182$, $\varepsilon=0.460$	〃 計算値	16.7	13.4	11.8	10.8	10.5	10.4	10.0	9.93	9.93
	誤差 %	1.8	5.0	7.1	0	4.0	1.0	2.8	0.6	3.3
$C_0=0.00426$, $G=496$	K_fa 実測値	15.17	4.83	4.03	3.81	3.32	3.31	3.12	3.26	3.0
$d_p=0.00327$, $\varepsilon=0.470$	〃 計算値	5.64	4.07	3.69	3.47	3.39	3.21	3.21	3.0	3.0
	誤差 %	9.1	14.5	8.4	9.2	2.1	3.0	2.9	8.0	0
$C_0=0.00577$, $G=496$	K_fa 実測値	13.7	11.2	9.71	9.77	8.86	8.71	8.78	8.27	8.27
$d_p=0.00182$, $\varepsilon=0.490$	〃 計算値	13.5	10.9	9.68	9.09	8.59	8.43	8.39	8.34	8.34
	誤差 %	1.5	2.7	0.3	7.0	3.0	3.2	4.3	0.8	0.8
$C_0=0.00781$, $G=722$	K_fa 実測値	11.5	8.55	7.47	7.35	7.05	6.9	6.63	6.5	6.3
$d_p=0.00182$, $\varepsilon=0.490$	〃 計算値	11.2	8.21	7.18	6.58	6.26	6.21	6.09	5.84	5.3
	誤差 %	1.7	4.0	3.9	10.5	11.3	10.0	8.1	10.2	11.0
$C_0=0.00872$, $G=722$	K_fa 実測値	10.0	7.0	5.92	5.59	5.49	4.97	4.85	4.69	4.56
$d_p=0.00182$, $\varepsilon=0.490$	〃 計算値	10.6	7.46	6.43	6.0	5.84	5.41	5.12	4.99	4.73
	誤差 %	6.6	6.2	8.6	7.3	6.4	8.8	5.6	6.4	3.7
$C_0=0.0104$, $G=482$	K_fa 実測値	2.49	1.82	1.52	1.41	1.36	1.18	1.16	1.13	1.13
$d_p=0.00327$, $\varepsilon=0.523$	〃 計算値	2.76	1.84	1.6	1.44	1.42	1.26	1.22	1.17	1.17
	誤差 %	10.8	1.1	5.3	2.1	2.1	6.8	5.2	3.5	3.5

5.6 実験式の検討

(42) 式の実験式は流速による Re と粒内拡散による ξ で表わされ，吸着剤の飽和度と初濃度の項でまとめられたので非常に簡単化された。ξ を更に検討すると，D_f は一定条件では一定であるから，β/D_s が q/q_0 の函数となり，D_s が分れば β を決定し得る。しかし D_s の測定値は殆んどないが，Wicke 等[14] によると定量的にはつきり表わしていないが，吸着剤の飽和度が増大するに従い D_s は減少すると報告している。一方 β は L_s/d_p で表わされるものであるから，単位長さ当りの拡散抵抗を表わすものと考えられる。$q/q_0=0$ 即ち被吸着質がガス境膜を通つて固体の表面に到達した瞬間では，無限に薄いガスが吸着剤の最も吸着し易い部分に吸着するものと考えられるから，拡散の抵抗は無視し得るほど小さいと考えられる。従つて $\beta=0$ 故に $\xi=0$ である。この様に考えると ξ に q/q_0 による影響も多少入つているが，むしろ β 即ち拡散抵抗が q/q_0 により大きく変化するものと考えられる。この実験式を用いて計算した K_fa の計算値と実測値を第3表に示す。これによると C_0 が小さい時は 5% 位の誤差であるが，C_0 が大きくなると誤差は 10% 程度になつていてかなり大きくなつている。

6. 総　　括

シリカゲル—空気—水系にて充填層における吸着について実験を行い，吸着剤の粒径，ガスの流速，ガスの濃度，充填層の高さを種々に変えて破過曲線を求めた。破過曲線の形は粒径流速，ガス濃度により変化するが，充填層の高さが吸着帯の巾より大きい時には充填高さによる影響は認められなかつた。又吸着帯は一定の巾で且つ一定の速度で層内を移動することが認められた。

この条件で総括容量係数は $\int_{y_1}^{y_2}\frac{1}{y-y^*}dy=\frac{K_fa}{\sigma\gamma}(\theta_2-\theta_1)$ により求められる。総括容量係数は吸着剤の粒径，流速，初濃度，吸着剤の飽和度によつて変化する。初濃度の影響は濃度の低い場合 (<0.005 kg H_2O/m^3 dry air) は殆んど無視出来るが，これ以上の場合には無視出来ない。総括容量係数は $\frac{1}{K_fa}=\frac{1}{k_fa}+\frac{m}{\sigma k_sa}$ の如くに粒外境膜容量係数と粒内境膜容量係数に分けられる。粒外境膜容量係数は q/q_0 と K_fa の実測値の $q/q_0=0$ の値として求めたが，粒外境膜物質移動係数 k_f を J 因子で整理し，Re との関係を求めると，Wilke, Hougen 等の結果とよく一致した。粒内物質移動係数は粒径，初濃度，吸着剤の飽和度の函数となり，これらを考慮して総括容量係数を次式で表した。

$$\frac{D_f(1-\varepsilon)}{K_fad_p^2}=0.64\,(Re)_{\mathrm{mod}}^{-0.35}+\frac{m\xi}{\gamma\sigma}$$

$$\xi=0.124\,[1-10^{-3.5\,(q/q_0)}] \qquad C_0<0.005 \text{ kg } H_2O/m^3 \text{ dry air}$$

$$=2050\,C_0^{1.4}\,[1-10^{-3.5\,(q/q_0)}] \qquad C_0>0.005 \text{ kg } H^2O/m^3 \text{ dry air}$$

この実験式は $C_0<0.005$ では約5%，$C_0>0.005$ では約10% の誤差の範囲内で実測値と合致した。

終りに実験に尽力を戴いた大塚嘉万氏に厚くお礼を申し上げます。

記　　号

a	比表面積	[m^2/m^3]
C	ガスの濃度	[kg H_2O/m^3 dry air]
C_0	ガスの初濃度	[〃]
C^*	ガスの平衡濃度	[〃]
d_p	吸着剤の粒径	[m]
D_f	ガス境膜拡散係数	[m^2/hr]
D_s	固体内境膜拡散係数	[〃]
G	流速	[kg/m^2 hr]
K_fa	総括容量係数	[kg/kg hr]
k_f	ガス境膜物質移動係数	[kg/kg m^2 hr]
k_s	固体内境膜物質移動係数	[〃]
L_f	ガス境膜の厚さ	[m]
L_s	固体内境膜の厚さ	[〃]
m	$\Delta y/\Delta x$	[—]
$N_f=N_s$	移動量	[kg/hr]
Q	吸着剤送入速度	[〃]
q	吸着剤単位重量当りの吸着量	[kg H_2O/kg]
q_0	Cに対する平衡吸着量	[〃]
q^*	C^*に対する吸着量	[〃]
S	充填層断面積	[m^2]
u	ガスの線速度 $=V/S$	[m/hr]
V	ガスの送入量	[m^3/hr]
x	比濃度 $=C/C_0$	[—]
y	比吸着量 $=q/q_0$	[—]
y_B	漏出点における q/q_0	[—]
y_E	終点における q/q_0	[—]
z	充填層の高さ	[m]
z_a	吸着帯の巾	[〃]
α	const	[—]
β	const	[—]
γ	充填密度	[kg/m^3]
ε	空間率	[—]
θ	時間	[min]
θ_B	漏出点の時間	[〃]
θ_E	終点の時間	[〃]
σ	q_0/C_0	[m^3/kg]
λ	$\sigma\gamma$	[—]
ξ	$\beta D_f/D_s$	[—]

文　　献

1) Boyd, G. E.: J. Am. Chem. Soc., **69**, 249 (1947).
2) De Vault, D.: ibid **65**, 532 (1943).
3) Eagleton, L. C. & Bliss, H.: Chem. Eng. Prog., **45**, 543 (1953).
4) 福田, 河添: 化学工学と化学機械, 114 (1949).
5) 福田, 河添: 最近の化学工学, **90** (1950).
6) 福田, 山本: 工業化学雑誌, **54**, 747 (1951).
7) Hougen, O. A. & Marshall, W. R.: Chem. Eng. Prog., **48**, 197 (1947).
8) Jury, S. H.: Chem. Eng. Prog., **48**, 102 (1952).
9) Kaston, P. R.: J. Phys. Chem., **56**, 683 (1952).
10) Lapidus, L.: Chem. Eng., **59**, No. 10, 164 (1952).
11) Michaels, A. S.: Ind. Eng. Chem., **44**, 1922 (1952).
12) Rosen, J. B.: J. Chem. Phys., **20**, 387 (1952).
13) Vermenlen, T. & Hiester, N. K.: Ind. Eng. Chem., **44**, 636 (1952).
14) Wicke, E.: Kolloid-Z., **86**, 167 (1939); **93**, 129 (1940).
15) Wilke, C. R. & Hougen, O. A.: Trans. Am. Inst. Chem. Eng., **41**, 445 (1945).