



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1報）：同筒型浮遊層の粒子挙動について
Author(s)	藤川, 昌久; 芝野, 毅; 安井, 進 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 64, 71-87
Issue Date	1972-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41085
Type	departmental bulletin paper
File Information	64_71-88.pdf



狭間隔浮遊層反応装置の基礎的研究とその応用 (第1報)

——円筒型浮遊層の粒子挙動について——

藤川 昌久* 芝野 毅* 安井 進* 久郷 昌夫*

(昭和46年11月30日受理)

Studies on Suspension Bed Reactor with Narrow Spacing (I) Particle Behavior of Cylindrical Suspension Bed

Masahisa FUJIKAWA, Tuyoshi SHIBANO, Susumu YASUI, Masao KUGO

Received November 30, 1971

Abstract

The suspension bed is an operation which is expected to be higher efficient of gas-solid contact than that of fluidization. In the suspension bed gas velocity (u) is higher than in fluidization; $u/u_t=0.6\sim 1.0$ (u_t =terminal velocity of a falling particle). Especially, the suspension bed with narrow spacing showed a uniformly dynamic suspension.

Suspension bed has two types of cylinder and box. This investigation intends to clarify the behavior of particles in the cylindrical type suspension bed which is affected by cylinder diameter, particle diameter, gas velocity ratio and height of suspension bed. The pressure drop also was observed with those factors as well as particle density.

1. ま え が き

1.1 研究の目的

気固間の反応装置としては、流動層、移動層、輸送層などが用いられており、このうち流動層が広く用いられているが、現在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、気一固の接触効率は考えられるほど大きくない¹⁾。このため比較的粒径の小さいものを流動化するためには、ガス流速 u を粒子終端速度 u_t の近くまで増大したり、また層内に挿入物を入れて気泡の大きさを制限するような試みがなされてきている。このため接触反応などにおいては触媒容積あたりの反応速度は固定層に較べると低いといった現象も認められている²⁾。

これらの欠点を克服するため、以上のほか種々の試みがなされているが³⁾、著者らはガス流速を増大し、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の高い反応装置の開発を企図した。

1.2 狭間隔浮遊層について

流動層においてガス流速 u と粒子終端速度 u_t との比 u/u_t は0.2位だが、 u を増大すると粒

* 応用化学第一講座

子層は不均一ながら活発に運動し、層全体に運動が広がるが、一部粒子は層外へ飛び出す。この不均一性を除き、また粒子の飛び出しを防ぐことを考えたものが、“狭間隔浮遊層”と名付けた本方法である。

すなわち u/u_t を 0.6~1.0 まで増大し、粒子を比較的濃厚な層として浮遊懸濁状態を保たしめる。この時接触の不均一を避けるため、層の下部に狭い間隔で並べた仕切板を挿入すると、接触効率が向上（箱型浮遊層に應用）といった現象が認められた。

2. 円筒型無整流浮遊層

2.1 無整流浮遊層

2.1.1 実験装置の形状決定

円筒型浮遊層のフローシートを図1に示す。最初整流板を使用せず、ガス吹込部を円錐形にして粒子の落下を防いだ。(図1) すなわち塔下部よりガス量 G を送入するとき、ガス吹込管(管径 D_1) 中のガスの流速を終端速度 u_t より

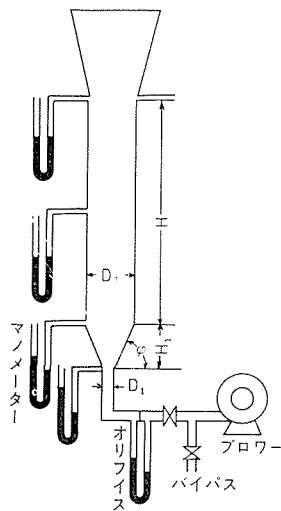


図1 浮遊層フローシート

かなり大きくしておいて落下を防ぐ。今硫酸滓 (60~80 mesh, $u_t=223$ cm/sec) の粒子を使用して表1の大きさの装置を用いて、各一定の空気量で浮遊させたところ、表2のようなガス流速で浮遊可能領域が認められた。すなわち空気吹込部管径 D_1 中においては、6.5 m 以上の空気流速がなければ、粒子は落下することが認められ、これは粒子終端速度 u_t の約3倍となっていた。次に各粒径の粒子について飛び出し速度 u_f を求めたところ、 u_t と共に示すと表3の如く求められた。

以上の実験よりガス吹込部径 D_1 、浮遊層径 D_T の浮遊層を設計する場合、本実験試料の 60~80 mesh のものについては、それぞれの流速は $u_1 > 6.5$ m/sec, $u < 0.8$ m/sec となる。連続の式と考え合わせると、 $D_1/D_T < 0.351$ なる関係が必要とされる。またガス吹込部の形状も影響しているように認められた。

2.1.2 圧力損失

上記の結果を基礎として図1と同様の表4に示す寸法の装置を用いて層中の粒子群の挙動を観

表1 装置の大きさ

No.	D_T [mm]	D_1 [mm]	H [mm]	D_1/D_T [-]
1-A	52	11	1000	0.211
1-B	52	16	1000	0.308
1-C	52	25	1000	0.480

表2 D_1 中の空気流速 u_1 [m/sec]

No.	G [l/min] (() 印は浮遊可能)						
	0.06	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15
1-A	(10.5)	(12.2)	(14.0)	(17.5)	(21.0)		(26.0)
1-B	3.9		5.2	(6.5)	(7.2)	(8.5)	(9.8)
1-C				3.4	4.1		5.1

表3 粒子終端速度 u_t と飛び出し速度 u_f

粒径範囲 [mesh]	ϵ_p [mm]	u_t [cm/sec]	u_f [cm/sec]
60~80	0.207	223	83.9
80~100	0.160	115	-
100~115	0.135	130	72.5
115~150	0.114	105	58.6
150~170	0.096	80.4	-
170~200	0.081	65.9	44.2

表 4 円筒型無整流浮遊層の形状と K

No.	D_r [mm]	D_1 [mm]	H [mm]	D_1/D_r [-]	φ [°]	$\cot \varphi$ [-]	K [-]
2-A	71	25	1000	0.352	77	0.230	7.1
2-B	88	25	1000	0.292	71.5	0.315	6.1
2-C	115	25	1000	0.217	63	0.450	6.2
2-D	71	25	1000	0.352	82	0.140	9.2
2-E	88	25	1000	0.292	83.5	0.112	11.4

表 5 無整流円筒型浮遊層の実験条件と記号

No.	G [l/min]	硫 酸 滓				ガラスビーズ		
		48~60 mesh 0.270 mm	60~80 mesh 0.207 mm	100~115 mesh 0.135 mm	115~150 mesh 0.114 mm	42~48 mesh 0.328 mm	48~60 mesh 0.270 mm	80~80 mesh 0.207 mm
2-A			○0.23	●0.215		□0.24		■0.24
						◇0.36		▣0.33
2-B		○0.24		●0.24		□0.24		
			○0.285	●0.286		◇0.36	▣0.39	
2-C			○0.215		◇0.13			■0.215
						◇0.36		▣0.31
2-D			○0.215	●0.215				
			◇0.24					
2-E			○0.24	●0.215				

察し、その時の層内圧力損失 ΔP_r と全浮遊量 M_r との関係を求めた。使用した粒子は表 5 の如きものであり、使用流体は常温常圧の空気である。実験方法は図 1 の塔下部ガス吹込部より一

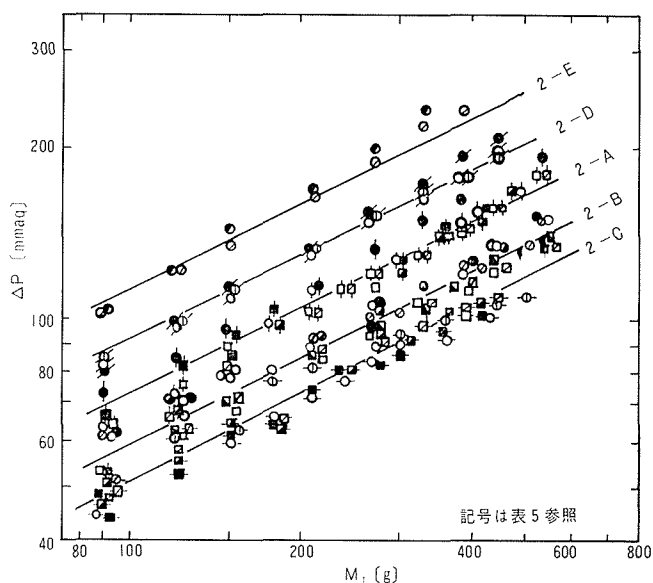


図 2 粒子浮遊量と全圧力損失

定流量 G の空気を送っている層中に秤量した試料 M_T を塔頂部より落下浮遊させ、各差圧測定部における空塔圧力損失 ΔP_T を求めた。

全浮遊量 M_T と全圧力損失 ΔP_T の関係を図示すると図 2 の如く両対数紙上で直線を得た。粒径や空気流量には影響を受けず、装置形状のみの影響が認められた。すなわち $\Delta P_T = K M_T^{0.5}$ で表わされ、 K の値は表 4 に示した。これらの値は塔吹込部の角度 φ に起因するものとみなされるので、係数 K と $\cot \varphi$ とを両対数紙上に表すと図 3 の如くになり、無整流浮遊層における全圧力損失 ΔP_T は、全浮遊量 M_T とその形状から次の実験式にて与えられることが認められた。

$$\Delta P_T = 3.1 \cot \varphi^{-5.6} M_T^{0.5} \quad (1)$$

2.2 円筒型狭間隔浮遊層

2.2.1 実験装置

前述の実験では粒子の運動は不安定であり、粒子は塔下部の円錐部に濃厚部となって堆積して動きが悪く、ガスはその中央を吹き抜けて粒子を管壁へ押付けているように観察された。これを均一に浮遊させるために次のことを試みた。すなわち、1) 流体の速度分布をなるべく均一にする。そのために中心部のガス流速を押え、円筒内の平均ガス流速を u_t に近ずける。2) 塔上部では u_t の 1/2 以下にして粒子の飛び出しを押える。

以上の目的に対し、中心部に図 4 に示すとき管径 D_2 の円筒型の内挿物を入れて狭間隔の環状部を作り、吹込部においては u_t の数倍のガス流速になるようにして粒子の落下を防ぐとともに、整流の役目を果たさせる。環状部断面積 A を塔上下方向に図 4 のように変化させて、ガス流速のゆるやかな減速を計り、塔の最上部では u_t よりはるかに小さな流速になるようにして粒子の飛び出しを防いだ。

2.2.2 圧力損失と浮遊量

この円筒型狭間隔浮遊層における装置形状と粒子挙動の関係を、圧力損失、全浮遊量を変えて前と同様の実験を種々の粒子について行った。実験装置は前述の 2-E ($D_T = 88 \text{ mm}$) の中へ、外径 $D_2 = 68 \text{ mm } \phi$ (3-A) と $61 \text{ mm } \phi$ (3-B) の円筒を装入した。使用した粒子は前述と同じである。一定の流速で空気を通しながら浮遊量を逐次増大してゆく。最初は比較的均一に浮遊しているが、次第に一個所に濃度の大きい部分を生じて不均一となる。また最初に現れた濃度の大きい点を中心に粒子が凝集する傾向が見られた。これら粒子運動の良否を圧力損失 ΔP_T と浮遊量 M_T との対比によって比較してみた。圧力損失 ΔP_T と浮遊量 M_T の関係は図 5 の如くになっている。一定浮遊量で圧力損失は空気流量 G の増加と共に減少する傾向がある。これは G の変

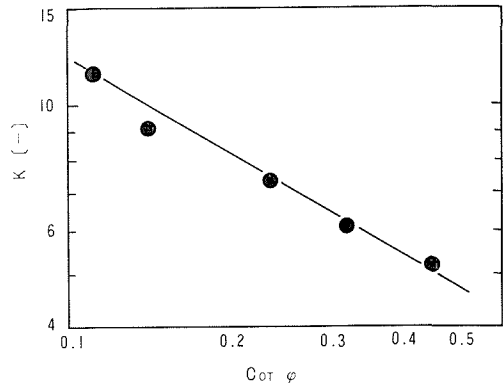


図 3 K の決定

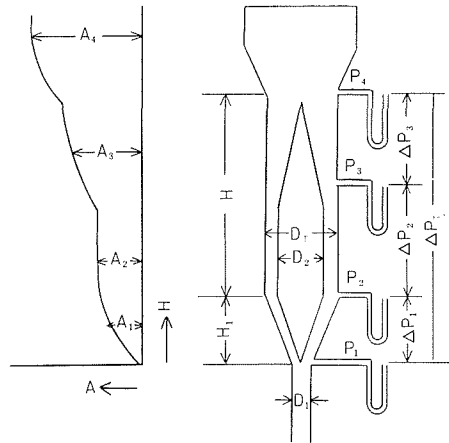


図 4 円筒型狭間隔浮遊層

化につれて塔内の粒子の流れ方向の分散範囲が変化することであり、簡単に全浮遊量 M_T を圧力損失 ΔP_T で割ったもの、 $M_T/\Delta P_T$ は塔断面積 A に等しいものと考えてみると、同一浮遊量に対して空気流量が増大し、 ΔP_T が減少することは、結局断面積 A が増大したことになり、この塔の構成から上部の断面積が広いので、空気流量の増大と共に分散範囲が円錐部の上部へ移動していると考えられる。またガス流量の少いときは円錐形の下部に堆積しているた

め、比較的断面積の小さいところに粒子が集積し、充填層に近い状態になって圧力損失が大きくなったものと考えられる。またこの装置の ΔP_T と M_T との関係は図 5 より ΔP_T は M_T の 0.6 乗に比例している。また粒径 d_p による差は、 d_p の大きいものほど、塔上部に分散範囲が広がることが認められ、一方粒子の種類、粒径が異っていても、終端速度の殆んど同一のものでは、塔内は同一の分散範囲となっていることが認められた。

2.2.3 浮遊層形成時の最大浮遊量

前と同様に、図 4 に示す浮遊層で p_2, p_3 間を 25 cm として一定の空気量を流し、試料を順次増大してゆくと、粒子が均一に分散浮遊している状態から次第に不均一になってくる。この時粒子の濃度の大小によって各部分に差圧が生じてくる。図 4 に示される各圧力タップ間の圧力損失をそれぞれ $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$ とし、その間にある粒子量を M_{T1}, M_{T2}, M_{T3} とすると、簡単に考えて $M_{T3} = \Delta P_3 A_3$, $M_{T2} = \Delta P_2 A_2$ とすると $M_{T1} = M_T - (M_{T2} + M_{T3}) = \Delta P_1 A_1$ と考えられる。各実験の結果とも全浮遊量 M_T の増大とともに全圧力損失 ΔP_T は増大しており、均一に浮遊分散している時には、 ΔP_1 は M_T にほぼ比例して増大しているが、浮遊状態が悪くなるとだんだん頭打ちの状態になる。そこで先に述べた方法によって $M_{T1}/\Delta P_1$ を求めたところ、浮遊状態の良い時には $M_{T1}/\Delta P_1$ は M_T にほぼ比例して増大するが、悪くなると変曲点を生じ、ほぼ一定値に近づく傾向を示した。この変曲点における浮遊量を浮遊層形成の最大浮遊量と考えた。この時 $M_{T1}/\Delta P_1 = A_1$ は断面積に相当していると考えられ、 A_1 とその時の M_T との関係を求めると表 6 と図 6 の如く M_T は A_1 に比例した。ま

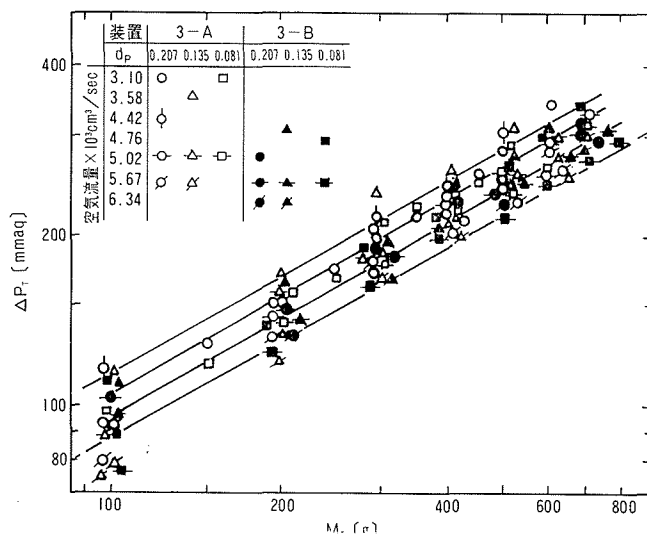


図 5 円筒型狭間隔浮遊層における全浮遊量と圧力損失

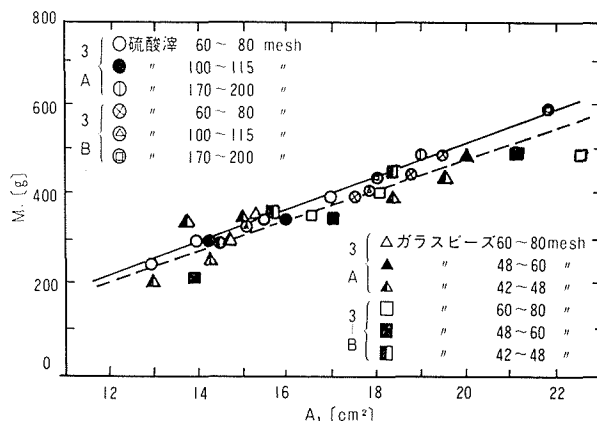


図 6 最大浮遊量の時の断面積

表6 最大浮遊量

No.	3 A				3 B				u_a	u_t	u_a/u_t
硫酸 滓	G [l/min]	M_T [g]	A_1 [cm ²]	u_a [cm/sec]	G [l/min]	M_T [g]	A_1 [cm ²]	u_a [cm/sec]			
60~80 mesh $d_p=0.207\text{mm}$	4.42	300	14.0	316	5.02	400	17.5	287	320	223	1.34
	5.02	350	15.5	323	5.67	450	18.8	307			
	5.67	400	17.3	328	6.34	500	19.5	328			
100~115 mesh $d_p=0.135\text{mm}$	3.58	300	14.4	249	4.42	350	15.4	287	280	130	2.16
	5.02	350	16.0	312	5.02	400	17.8	282			
	5.67	450	18.0	308							
170~200 mesh $d_p=0.081\text{mm}$	3.10	300	14.5	214	4.02	500	16.0	252	260	65.9	3.98
	5.02	500	19.0	264	5.70	600	21.8	260			

た A_1 は最大浮遊量を保持し得る塔断面積と考えると、 $G/A_1=u_a$ はこの塔の最大浮遊量を得る空気流速となり、表6に示すように u_t に比例せず、粒径の小さい方が粒子を浮遊させるのには、はるかに大きな空気流速を要することがわかった。

2.2.4 浮遊層形成中の粒子密度

浮遊層中間の上下差圧を測定していると、前述のように層の上下で時間ごとに濃度に変化することが認められた。一般に空気流量の低い時には下方の円錐形環状部で粒子密度が高かったものが、空気流量の増大につれて、円錐形環状部より上方にも粒子密度が増大するようになり、ある流量で塔上下の粒子密度がほぼ等しくなることが認められた。そこで2種類の粒子（硫酸滓 60~80 mesh, 100~115 mesh）のものについて浮遊粒子分散密度 ρ_s を求めた。方法は図7のごとく環状部 A とその上部 B との2点の一定区間で差圧 ΔP_A と ΔP_B とを測定する。各区間の粒子量は各差圧が測定点の断面積に受ける重量であるとする、各区間の粒子重量は $M_{TA}=\Delta P_A/A_A$, $M_{TB}=\Delta P_B/A_B$ となり、それぞれの測定区間の容積を V_A , V_B とすると、各区間の粒子分散密度 ρ_{sA} , ρ_{sB} は $\rho_{sA}=M_{TA}/V_A$, $\rho_{sB}=M_{TB}/V_B$ として求められる。この ρ_{sA} , ρ_{sB} はある空気流

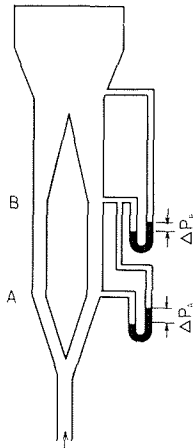


図7 浮遊層中の密度測定

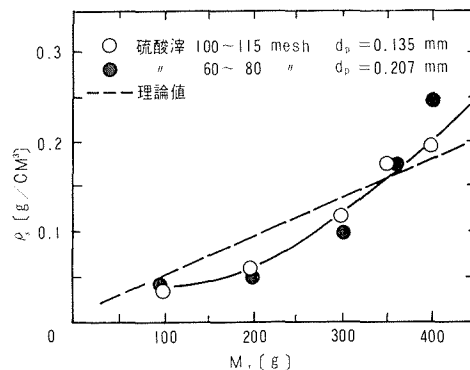


図8 全浮遊量と層内粒子分散密度

量以上ではほぼ一定になることより、この時の密度を浮遊層分散密度 ρ_s として求めた。全浮遊量と層内粒子分散密度との関係を表したものが図 8 である。また理論値として破線で表したものは、各空気流速で流した時、入口より線速度 140 cm/sec になる断面積までの容積を計算し、浮遊量 M_T がその容積中に均一に分散しているものと考えた理論線である。両者の比較により、層内は適当な条件を選べば均一に粒子が分散しているとみなせることがわかった。

以上のことから狭間隔浮遊層では、粒径に応じて最低のガス流速が必要であることが考えられ、硫酸滓を用いた時には、60～80 mesh で 145, 100～115 mesh で 120, 170～200 mesh で 95 cm/sec の流速が必要であった。

3. 整流板付円筒型浮遊層

3.1 実験方法

これまでの検討によって狭間隔浮遊層の性状は明らかになったが、ガス吸込部でデットスペースが生じたり、層が不安定になる欠点が生じている。そこで流動層と同様に整流部を持つ浮遊層によって基礎実験を行なうこととし、特に箱型狭間隔浮遊層の幅に相当する管径の影響について種々の測定を行った。

表 7 使用粒子性状

試料名	粒径範囲 [mesh]	平均粒径 [μ]	密度 [g/cm ³]	終端速度 [cm/sec]
シリカゲル	60～80	207	1.51	105.5
	48～60	270	1.51	142.5
	42～48	321	1.51	172
	35～42	382	1.51	211
	28～35	496	1.51	272
	20～28	700	1.51	376
	16～20	953	1.51	462
	14～16	1128	1.51	670
硫酸滓	60～80	207	4.237	223
	80～100	160	4.285	158
	100～115	135	4.314	130
	115～150	114	4.330	105
	150～170	96	4.661	80.4
	170～200	81	4.483	65.9
ガラスビーズ	20～28	700	2.499	587
	42～48	322	2.485	248
	48～60	270	2.485	201
	60～80	207	2.491	148
いごま	10～12	1518	-	587

実験装置は各々の径の異なるガラス管の下部に 200 mesh の金網をつけたもので整流板の上下差圧を測定するマノメーターをつけている。実験に使用した試料は表 7 に示すごときのもので、平均粒径は篩間の幾何平均とし、その密度と粒子終端速度もそれぞれ計算して示した。使用流体は常温の空気である。

3.2 浮遊層高の測定

3.2.1 ガスの流速と層高について

最良の浮遊状態を得るための条件を求める実験を行った。各管径の管に試料を $M=3 \text{ g/cm}^3$ の浮遊量になるように各種の試料を入れ、 $u/u_t=0.1\sim 1.0$ の範囲で試料を浮遊させた。浮遊層は整流板に近い下部ほど浮遊密度が高くまた浮遊密度の高い部分が波のように上下に振動している。そこでこの浮遊密度の高い波の最高部を浮遊層高 L として測定し、静止層高 L_0 との比 L/L_0 を測定した。使用粒子はシリカゲルである。各管径についての結果を図9の (a)～(d) に示す。空気流速 u/u_t の増加につれて最初は粒径 d_p に無関係に一樣に上昇していくが、或る値以上から急激に上昇している。これは前半の流動層領域が浮遊層領域に移ったものと判定される。これら両領域については次の (2), (3) 式が適用される。

$$\text{流動層領域: } L/L_0 = 9.5 u/u_t \quad (2)$$

$$\text{浮遊層領域: } L/L_0 = a(u/u_t) \quad (3)$$

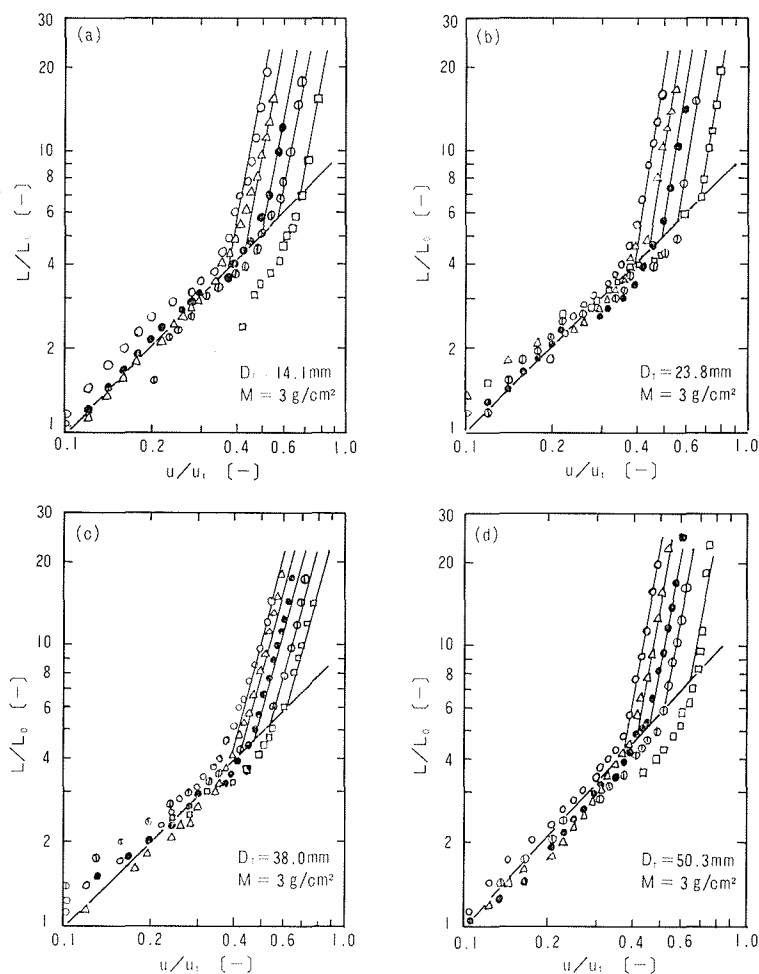


図9 ガス流速比と層高比 (空気-硫酸系)

粒径 d_p [mm] (○: 1.128, △: 0.953, ●: 0.700, ⊙: 0.382, □: 0.207)

(2) 式は塔径、粒径に関係なく表わされているが、浮遊層領域 (3) の式では表8に示されるように b の値は塔径 D_T にのみ依存し、最も浮遊状態の良い $38 \text{ mm } \phi$ の時が最も小さな値を示した。また a は塔径 D_T と粒径 d_p の双方の影響を受けている。ここで (2), (3) の両直線の交点

表8 (3)式における a と b

mesh	d_p [mm]	$D_T=14.1$ mm		$D_T=23.8$ mm		$D_T=38.0$ mm		$D_T=50.3$ mm	
		a	b	a	b	a	b	a	b
14~16	1.128	920	6.00	670	5.57	94	3.22	1400	6.00
16~20	0.953	500	6.00	640	5.57	79	3.22	900	6.00
20~28	0.700	440	6.00	490	5.57	62	3.22	530	6.00
35~42	0.382	130	6.00	430	5.57	39	3.22	295	6.00
60~80	0.207	95	6.00	93	5.57	31	3.22	98	6.00

における流速を，浮遊開始速度 u_{ms} と定義することにした。

3.2.2 粒子径と浮遊層高について

3.2.1 の結果にもみられたように層高は粒径の大きいものほど一定の流速比 u/u_c に対し高い層高 L/L_0 を与えている。そこで流速および浮遊量を一定にして層高の変化を求めた実験結果を表9と図10に示した。すなわち粒径の大きいものほど同一条件下では浮遊層高が高くなっていることを示している。このことは粒子の大きいものほど，比較的自由な粒子運動が可能であることであって，浮遊状態の良いことを明らかにしている。

表9 粒径と層高

d_p mm	L cm
0.114	7
0.207	10
0.382	35
0.953	40

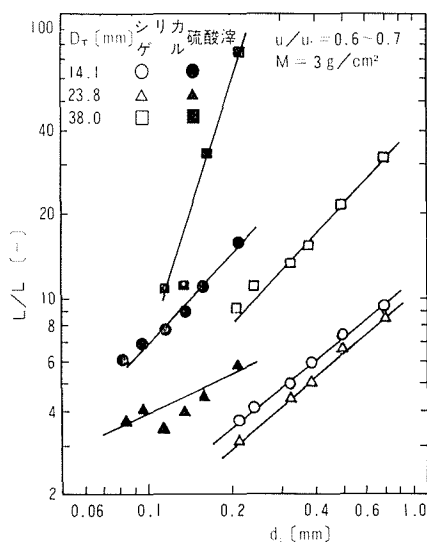


図10 粒径と層高

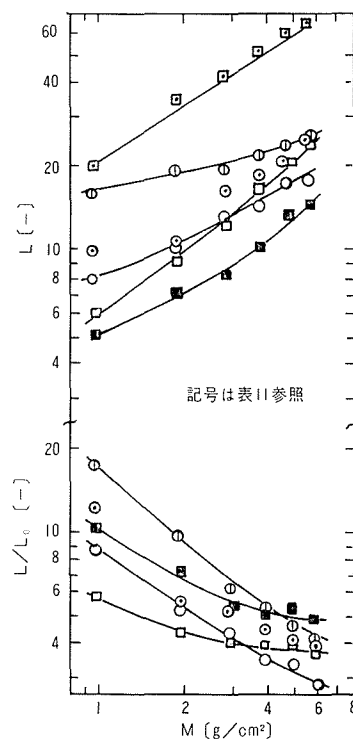


図11 浮遊量と層高

3.2.3 粒子浮遊量と層高について

これまでの実験では浮遊量を常に一定としてきたが今度は塔径，粒径を一定として浮遊量を変化して層高に対する影響をみた結果を図11に示した。この図で示されるように，層高 L は浮遊量 M の増大と共にやや増大していることがわかる。しかし層高比 L/L_0 では浮遊量の増大と共にむしろ減少する傾向を示している。このことは測定方法とも関連するのであるが，浮遊量を増大しても層自体の高さの増大が目に見える程大きくならず，層内での粒子密度の増大の方向につ

ながる傾向を示したと考えた方が適切である。

3.3 スラツギングの形成について

浮遊層形成の時の悪い条件として、スラツギングが生じて層が不安定になることがある。このためスラツギング形成の限界を予め求めておく必要がある。

3.3.1 ガス流速一定のとき

前記の装置を用いて空気流速を $u/u_i=0.6\sim0.7$ に一定としてしておいて、徐々に浮遊量を増大させてゆくと、浮遊状態からスラツギング状態に移り、その結果、上下差圧のマノメーターが上下に振動し始めるようになる。この幅が 10 mm を越えた時の浮遊量を測定し、この量を空気止めた時の静止層高 L_0 に相当させて求めることとし、この時の層高をスラツギング開始時静止層高 L_{0S} とした。各塔径、各粒径について測定した結果塔径と粒径の比、 D_T/d_p と L_{0S}/D_T に対比してプロットすると、図 12 の如き直線関係が得られ、この実験範囲内の実験式として次の (4) 式を得た。

$$L_{0S}/D_T = 50 (D_T/d_p)^{-0.65} \quad (4)$$

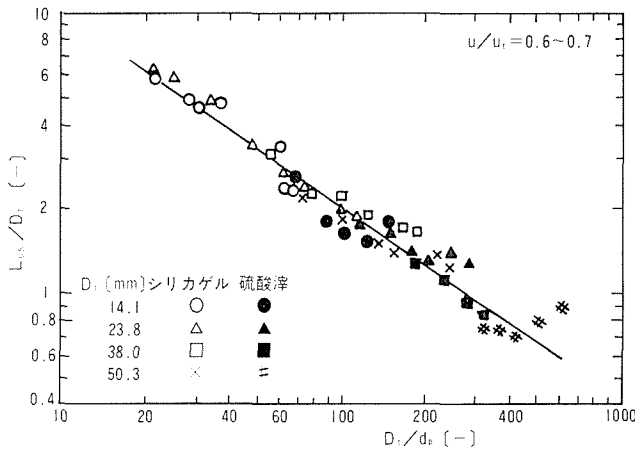


図 12 スラツギングに変化する時の浮遊量と塔径/粒径比

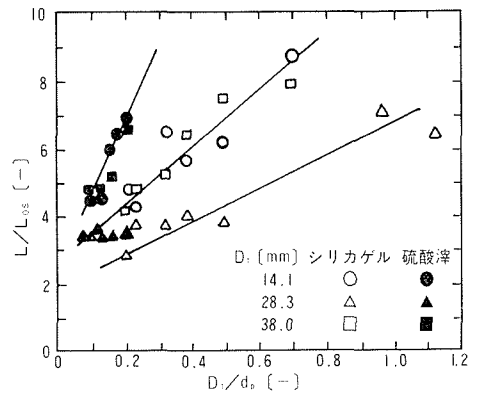


図 13 粒径と層高

すなわち同一塔径の時、粒径の大きい方がスラツギングを生じ難く、均一な浮遊層を形成し易いことがわかった。

またスラツギングに移行する時の層高比、 L/L_{0S} と粒径の関係をみると図 13 が得られ、これよりスラツギングを形成し始めるのは、層中の単位容積あたりの粒子个数、すなわち空隙率と関係があるものと推定される。そこで次の仮定をおいて単位容積中の粒子个数を算定し、粒径との関係を求めてみた。粒子は完全に均一に分布し、完全球形と仮定すると、1 ケの粒子の重量は $m = \pi d_p^3 \rho_s / 6$ であり、また単位容積中の粒子の重量 $m_T = 4M_T / L \pi D_T^2$ であるから、単位容積中の粒子の数 (N_p) は次式で算出される。

$$N_p = \frac{m_T}{m} = \frac{24M_T}{\pi^2 D_T^3 L d_p^3 \rho_s} \quad (5)$$

この N_p 対 d_p の関係を図示すると図 14 の如くに直線となり

$$N_p = 185 (d_p)^{-3.1} \quad (6)$$

の実験式を得た。この式を変形して、静止層高 L 、粒径 d_p 、浮遊粒子密度 ρ_p 、嵩密度 ρ_b を使ってスラツギング開始時の静止層高 L_{0S} を表すと

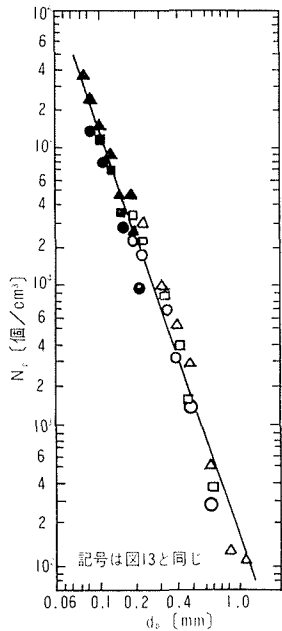


図14 粒径と粒子数

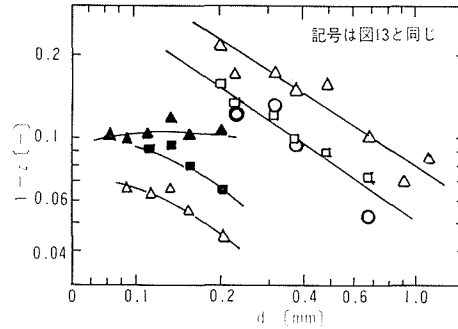
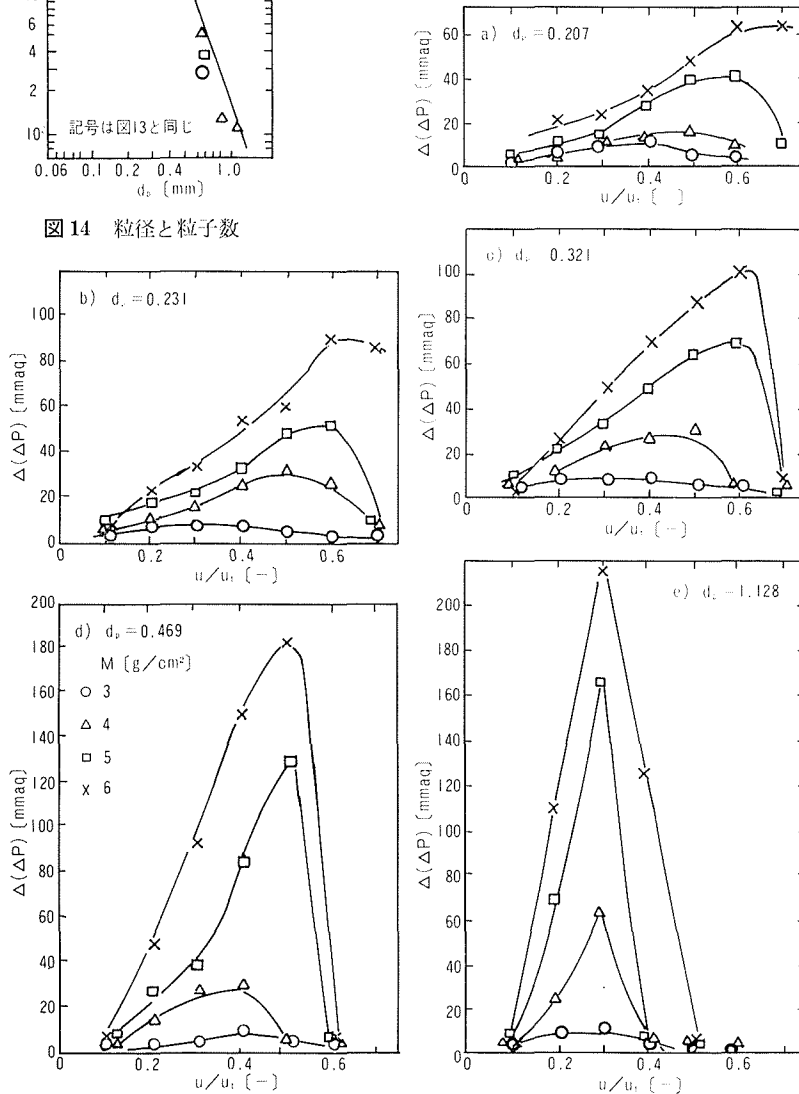


図15 粒径と空隙率

図16 ガス流速比と圧力損失差 ($D_T=23.8$ mm)

$$L_{0S} = 71 \frac{\rho_p}{\rho_b} L D_T (d_p)^{-0.1} \quad (7)$$

なる実験式が得られ、流速比 $u/u_t = 0.6 \sim 0.7$ において塔径 D_T 中に粒径 d_p の粒子を空気で浮遊させた場合の浮遊状態からスラツギングに変化する時の層高を求めることが出来る。

また、粒径 d_p と空隙率 $1-\varepsilon$ の関係を図示すると図 15 の如くになった。これより粒径 d_p の大きい方が浮遊状態が良好であるとの結果となっている。またこれらの諸実験から塔径 $D_T = 23.8$ mm の場合が最も良い浮遊状態を示しており、これより塔径の小さい時には壁との影響でスラツギング状態を作り易く、また大きい時には吹き抜けを生じ易いことを示している。

3.3.2 浮遊量一定のときのスラツギング形成条件

シリカゲルを用い浮遊量を一定に保ち空気流速を変化させて浮遊状態を検討した。すなわち空気流速を増大させるにつれて、流動層状態が不安定となり、スラツギングが始まり、更に流速の増大につれてスラツギングが消失して浮遊層を形成し、遂には粒子が飛び出す現象が認められる。そこでスラツギングの開始する空気速度、スラツギングの消失する空気流速、浮遊層を形成する流速、粒子の飛び出す流速を測定した。各種の塔径の塔の中に各粒径のシリカゲル粒子を浮遊量 $M = 3, 4, 5, 6$ g/cm² 入れて、空気流速を徐々に上げて、層の状態を観察する。この時、塔の上下差圧は流速の増大につれて、激しく変動するようになる。この時の最大差圧 $\Delta P_{\max}$ と最小差圧 $\Delta P_{\min}$ との差を $\Delta(\Delta P)$ として測定すると、一例として図 16 の如くになっており、 $\Delta(\Delta P)$ の大きいところがスラツギングの激しいところである。更に流速を増すとスラツギングが消失し、良好な浮遊層が形成することが認められた。このためスラツギングの消失速度として、 $\Delta(\Delta P)$ が 10 mm 以下になる点をもってその速度とした。この時の浮遊量、層高、空気流速を測定し、またその時の単位体積中の粒子数 N_p も算出した。スラツギングの消失する時の粒径とガス流速は図 17 にみられるように、塔径によって異っており、 $D_T = 23.8$ mm の場合が低いガス流速でスラツギングが消失している。また粒径の大きいものほどスラツギングの消失速度も小さい。すな

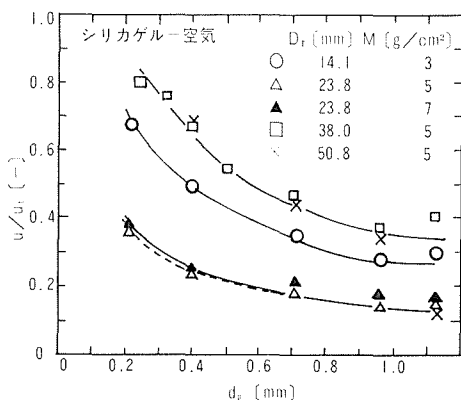


図 17 スラツギングが消失する時の粒径と流速比

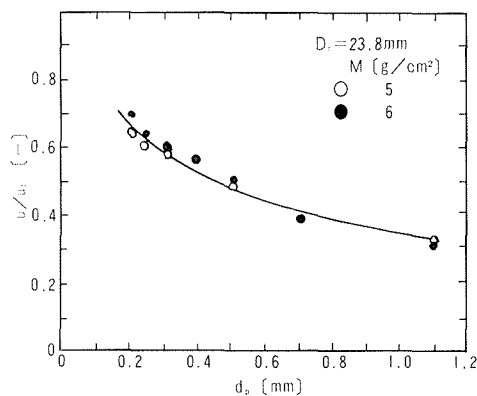


図 18 最大のスラツギングを生ずる流速と粒径

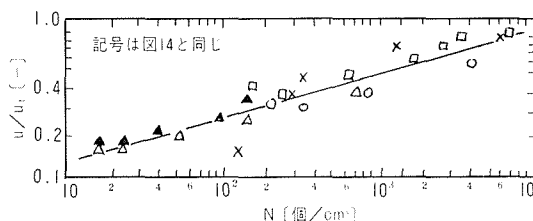


図 19 ガス流速比と粒子数

わち塔径と粒径の適当したものを選ぶことにより、良好な浮遊層を得る条件のあることを見出した。また $\Delta(4P)$ が最大を示す点が図 16 でみられたが、この時の流速は最大のスラツギングを生ずる空気流速と考えられる。その一例として $D_T=23.8\text{ mm}$ の塔について示すと図 18 に示すように、粒径の大きくなるほど u/u_t も低い値を示しており、各塔径についてもほぼ同一の結果を示した。このことは先の図 16 で示したスラツギングの消失する u/u_t とよく似た関係となっており、スラツギングから浮遊層へ移行する状態を示している。

スラツギングが消失する時の単位容積中に存在する粒子数 N_p と u/u_t の関係をみると図 19 の如き直線関係を得た。この結果の実験式として

$$u/u_t = 0.08(N_p)^{0.37} \quad (8)$$

が得られたが、これを塔径 D_T 、粒径 d_p 、層高比 L/L_0 、粒子密度 ρ_p ならびに浮遊層分散密度 ρ_s で表すと

$$N_p = (M_T / \frac{1}{4}\pi D_T^2 L) / (\frac{1}{8}\pi d_p^3 \times \frac{4}{3}\rho_p)$$

より

$$\frac{u}{u_t} = 0.111 \left(\frac{L_0}{L} \frac{\rho_s}{\rho_p} \frac{1}{D_T^2 d_p^3} \right)^{0.37} \quad (9)$$

という関係で表わされ、この式によってスラツギングの生成を防ぐガス流速を計算で知ることが出来る。

上記 (9) 式の実験式では浮遊層を形成し得るガス流速に対する粒子径 d_p と塔径 D_T の影響が明らかにされていない。このため先の実験装置によって、塔内の静止滞留量が 1.5 又は 1.7 と一定になるように、各粒径のシリカゲルを浮遊させ、スラツギングが消失する時の空気流速 u/u_t を測定した。結果は D_T/d_p と u/u_t でプロットすると図 20 に示す直線となり、実験式として

$$u/u_t = 0.068(D_T/d_p)^{0.5} \quad (10)$$

の関係を得た。すなわち同一の塔径の場合、粒子径の大きいものほどスラツギング状態から浮遊層に変化する空気流速が大きいことになる。またこの時 $D_T=14.1\text{ mm}$ の場合は壁の影響が大きくて、スラツギング状態が消失しなかった。このことは塔径が 23.8 mm 以上のものでは D_T/d_p は大約 25 以上になっているが、 $D_T=14.1\text{ mm}$ の塔の時には、他の塔径では浮遊し易い大きな粒子でも D_T/d_p がかなり小さく、(例えば 20~28 mesh のもので $D_T/d_p=20$) D_T/d_p がある値、これまでの塔径では D_T/d_p が 25 位以上でないと良い浮遊状態を作り得ないのではないかと考えた。

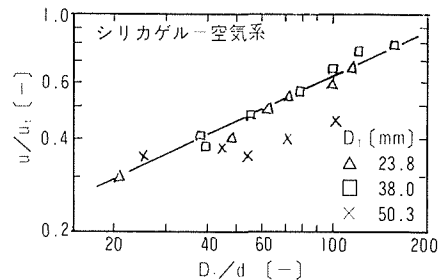


図 20 ガス流速比と塔径粒径比

3.4 浮遊層における圧力損失

浮遊層は流動層における時よりもガス流速が早いいため、またそれにより粒子間や粒子壁間の摩擦抵抗も大きいので圧力損失が大きくなるのではないかと考えられる。塔中における理論的圧力損失 ΔP_{th} は

$$\Delta P_{th} = (\text{浮遊粒子量 } M_T) / (\text{層の断面積 } A) \quad (11)$$

として考えられるが、実測される ΔP_T は流速の増大とともに増大するものと考え測定した。

3.4.1 圧力損失に対する粒子径の影響

(11) 式で与えられた以上の圧力損失が、粒子間や粒子壁間の衝突や摩擦によるエネルギー損

失であると考え、浮遊量を一定として、塔径 D_T と粒子径 d_p および空気流速 u/u_t をそれぞれ変えて実験した。 $\Delta P_T/\Delta P_{th}$ と D_T/d_p との関係をみると図 21 のごとくになり、 $\Delta P_T/\Delta P_{th}$ は D_T/d_p に影響されず、1.0~1.2 の間ではほぼ一定の値を示した。ただ D_T/d_p の大きい方では空気の吹き抜けによるためやや小さくなる傾向を示した。

3.4.2 圧力損失に対する浮遊量の影響

上記と同様の実験で u/u_t と d_p を一定にしておいて浮遊量を変化させた結果を図 22 に示した。この結果では浮遊量の増加と共に $\Delta P_T/\Delta P_{th}$ が増大している。これは浮遊量が増大すると、粒子間、粒子壁間の摩擦によるもので、予想された結果であり、塔径の小さい方が $\Delta P_T/\Delta P_{th}$ が大きくなっている。また塔径の大きい方は吹き抜けているためか、この値が小となり、結局 $\Delta P_T/\Delta P_{th}$ が 1.0~1.2 になっているところが、安定した浮遊状態を示しているものと考えられる。

3.5 浮遊層内における粒子密度

浮遊層においてはガス流速の変化に従って粒子運動も激しく変っている。

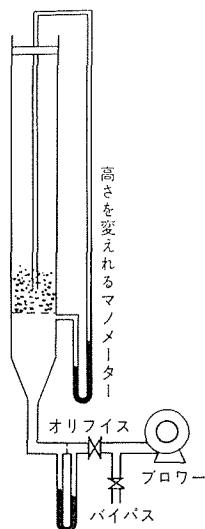


図 23 粒子密度測定装置

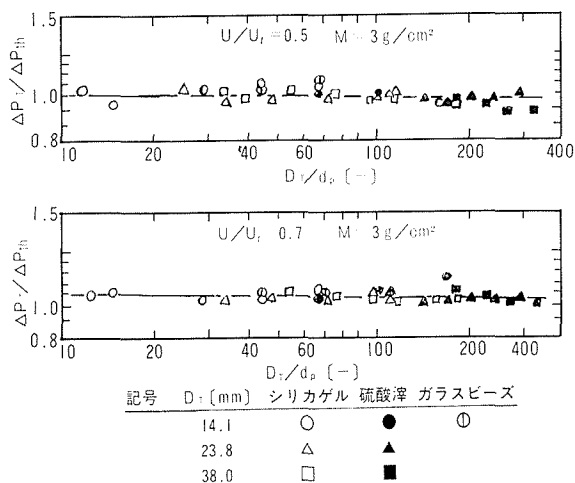


図 21 塔径粒径比と圧力損失比

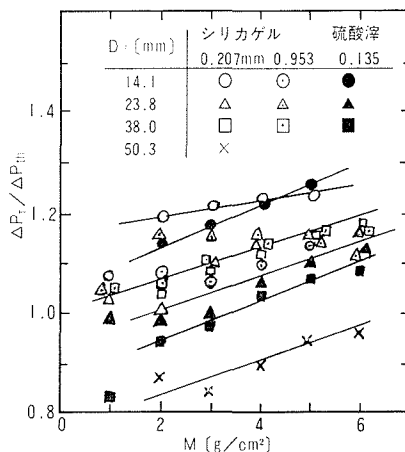


図 22 浮遊量と圧力損失比

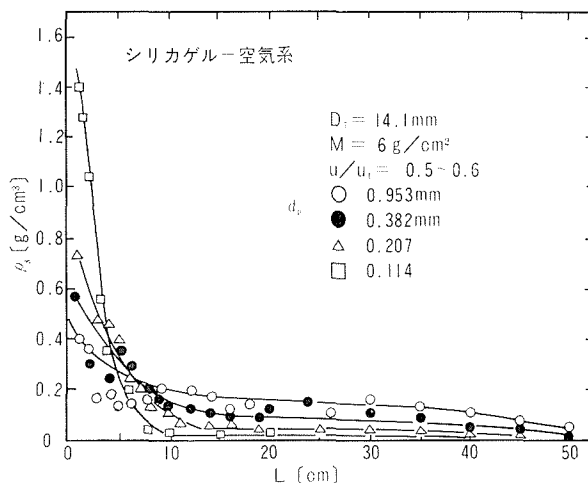


図 24 整流板からの高さ粒子密度（粒径の影響）

このため層内の粒子密度も、各時間、各場所において相当異っているものと考えられる。従って塔内横方向の粒子密度は等しいものと仮定して、図 23 に示すような層中の高さを変えれるようにしたマメメーターによってその高さの圧力損失 ΔP_T を測定し、浮遊量 M_T と整流板よりの高さ z によって層内粒子分散密度 ρ_s を

$$\rho_s = M_T / (\pi D_T^2 z / 4) = \Delta P_T / z \quad (12)$$

の関係で求めた。各塔径、各粒径の粒子を用いて測定した結果では、整流板から塔径により定まるある高さまでは $\rho_s = 0.1 \text{ g/cm}^3$ 程度で、ほぼ一定であったものが、高さの高くなるにつれて稀薄となっていること、また粒径の大きいものほど層内上下方向に均一な粒子分散密度分布をしていることが明らかとなった。図 24 に粒径の変化に対する層内分散密度分布の一例を示したが、これまで目で観察していた層高を $\rho_s = 0.1 \text{ g/cm}^3$ 以上の場合と規定すると前出の表 9 の如くに粒径に応じて層高を規定することが出来る。次に塔径の影響を測定したものが図 25 で、塔径の小さいものほど良い層内分散状態を示していることがわかる。しかしこの場合も D_T/d_p によりある限界値が考えられる。

3.6 浮遊層中の粒子の運動状態の変化

これまで種々検討したところから、浮遊層中の粒子運動は空気流速の増大につれて、(1) 流動化開始、(2) 流動層形成、(3) スラツギング開始、(4) 不安定状態、(5) スラツギング消失、(6) 浮遊層形成開始、(7) 浮遊層形成、(8) 粒子の飛び出し、(9) 輸送層の順に変化している。そこで、3.3.2 で述べたスラツギング形成条件の実験と同様に、浮遊量を一定 ($M = 3 \text{ g/cm}^2$) とし、各塔径、各粒径のシリカゲルを空気中で浮遊させ、(a) スラツギング開始速度 u_{s1}/u_t 、(b) スラツギング消失速度 u_{s12}/u_t 、(c) 浮遊開始速度 u_{ms}/u_t 、(d) 粒子飛び出し速度 u_f/u_t を測定し

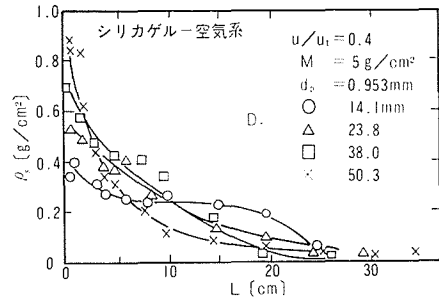


図 25 整流板からの高さと粒子密度 (塔径の影響)

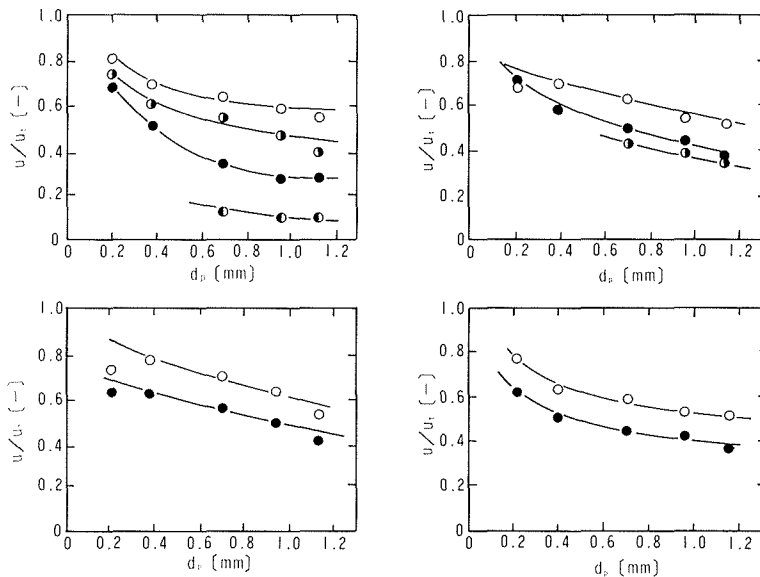


図 26 粒子の運動状態の変化

記号 ●(a)スラツギング開始速度 ●(b)浮遊開始速度 ●(c)スラツギング消失速度 ○(d)粒子飛び出し速度

た。浮遊開始速度は先の図 9 における交点の値を使用した。各条件について粒径と対比して示すと図 26 の如くになった。各塔径において粒径が大きくなるにつれて、それぞれの速度は小さくなっている。この結果を D_T/d_p について示すと、図 27 の如き直線性があるが、 D_T/d_p の小さいところにおいては、直線から外れる傾向が認められ、壁との抵抗の大きいことを示している。いづれにしろこれらと同様の実験を各粒子について行うことにより、浮遊層を形成し始める空気流速を予知し得ることになり、良好な浮遊層状態を得るには (c) と (d) との間で流速を定めれば良いことがわかった。

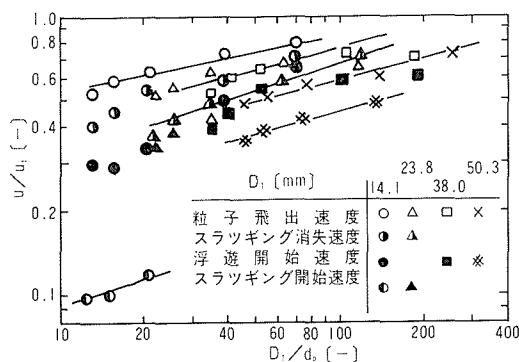


図 27 塔径粒径比と流速比

4. む す び

これまで円筒型浮遊層の形状決定から始めて、無整流型、狭間隔無整流型、整流板付型の各種浮遊層の粒子挙動について実験結果からおおよそ次のようなことが明らかになった。すなわち u/u_0 を 0.5~1.0 に上げて浮遊層を形成させるときに、円筒型ではスラッシングの形成があって浮遊層形成の阻害となり、塔径、粒径によって良好な浮遊層を形成する範囲のあることや、圧力損失、浮遊層内密度への影響が明らかとなった。

文 献

- 1) Zenz, F. A. and D. F. Othmer: *Fluidization and Fluid Particle Systems*, Reinhold Publishing Corp., New York, 1960.
- 2) Kunii, D. and O. Levenspiel: *Fluidization Engineering*, John Wiley, and Sons. Inc., New York, 1968.
- 3) Grace, J. R. and D. Harrison: *Chem. Proc. Eng.*, June, 1970, p. 127.

使 用 記 号

A	浮遊層断面積 (添字は位置による)	$[\text{cm}^2]$
D_T	浮遊層塔径	$[\text{cm}]$
D_1	ガス吹込管径	$[\text{cm}]$
D_2	内挿管外径	$[\text{cm}]$
d_p	粒子径 (平均)	$[\text{mm}]$
G	ガス流量	$[\text{l/min}]$
H	浮遊層平行部塔高	$[\text{cm}]$
H_1	浮遊層円錐部塔高	$[\text{cm}]$
L	浮遊層高	$[\text{cm}]$
L_0	静止層高	$[\text{cm}]$
L/L_0	層高比	$[-]$
L_{0s}	スラッシング開始時静止層高	$[\text{cm}]$
M	浮遊粒子量 (単位断面積当り)	$[\text{g/cm}^2]$

M_T	浮遊粒子量 (添字は位置による)	[g]
m	粒子 1 ケの重量	[g]
m_T	単位容積当りの粒子重量	[g/cm ³]
N_p	単位容積当りの粒子数	[個/cm ³]
P	塔内圧力 (添字は位置による)	[mm aq]
ΔP	圧力損失 (添字は位置による)	[mm aq]
ΔP_T	全圧力損失	[mm aq]
ΔP_{th}	理論上圧力損失	[mm aq]
$\Delta(\Delta P)$	最大-最小圧力差 = $\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min}$	[mm aq]
u	ガス流速 (平均)	[cm/sec]
u_a	最大浮遊量を得る流速	[cm/sec]
u_1	ガス吹込管内流速	[cm/sec]
u_f	粒子飛び出し速度	[cm/sec]
u_{ms}	浮遊開始速度	[cm/sec]
u_{sl1}	スラッシング開始速度	[cm/sec]
u_{sl2}	スラッシング消失速度	[cm/sec]
u_t	粒子終端速度	[cm/sec]
V	浮遊層容積 (添字は位置による)	[cm ³]
z	整流板よりの高さ	[cm]
φ	浮遊層吹込部角度	[°]
ρ_p	粒子密度	[g/cm ³]
ρ_s	層内粒子分散密度	[g/cm ³]
ρ_b	浮遊層嵩密度	[g/cm ³]
$1-\epsilon$	空隙率	[—]