

# 移動層および固定層における集塵性能について (第一報)

— 装置の圧力損失について —

和田憲造\*・藤井数男\*\*・早野延男\*・上滝具貞\*\*\*

Characteristics of the Fixed and Moving Bed Dust Collector (I)

— Pressure Drop across the Beds —

Kenzo WADA, Kazuo FUJII, Nobuo HAYANO and Tomosada JYOTAKI

## Abstract

Moving bed and fixed bed filled with granular material have wider applicability for many chemical engineering processes. In this report we investigate the moving bed and fixed bed as the dust collection apparatus. It is well known pressure drop across the bed is one of the most important characteristics of this type apparatus, then as the first step, we obtained the experimental results about the correlation between pressure drop of bed and the flow quantity of air (this time, only air flow without containing dust). Experiments have been done for the beds with different geometry and the several kinds of air inlet positions.

## 1. ま え が き

垂直な層内で粒子どおしが互いに接触し、粒子間の動きがほとんどない状態で、流体がその間隙を流れる時を固定層といい、充填した固体粒子を層底より排出せしめ、層頂から連続的に供給し、粒子層は重力の作用によりゆっくりと下降する。このような層を移動層という。

移動層は石油工業において石油の熱分解、接触分解、コークス化あるいはセメント製造等に應用されており古くから実用に供されている。この移動層が本質的にダストを回収する媒体としての機能をもっていることに着目して、移動層集塵装置として応用する研究が行なわれ、G. C. EGGLESON らが粉体のガス化プロセスでガスに同伴されるダストをコークス粒子で連続的に分離し高い集塵効率を得られたと報告している<sup>1)</sup>。

即ち移動層集塵装置とは、この移動層において含塵ガスを下部より流入せしめ、気流中に含まれるダストを層内の充填粒子により連続的に分離・回収する装置

をいい、ダストを付着した粒子はそのまま別工程へ流されるか、あるいは粒子からダストを除去し再利用されることになる。実際例としては上述の例や、またセメント工場においてクリンカーによりダストを捕集している例もあるが未だ実用例も少なく、また理論的研究も少ないのが目下の現状であり、今後の研究に負うところが大きい。

移動層は流体を流す方向により、並流式移動層と向流式移動層に分けられる。今回は向流式移動層により実験を行った。

集塵装置において非常に重要な因子の一つに圧力損失がある。圧力損失は層内に流体を流した場合の層の抵抗と考えられ、直接動力費に関係してくるものである。今回はまず層内に空気のみを流した場合の圧力損失と流量の関係について、層内の形状を変化させ、又空気流入位置を変化させて実験を行ったので報告する。

## 2. 実験装置及び方法

実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。装置は送風機、移動層(固定層)容器及びテーブルフィダーにより構成されている。層内への空気の流入位置は図中記号④、⑤の2カ所とし、空気は送風機によりこの2カ所から送り込まれる。④、⑤への風量の調節はそれぞれのダ

\* 生産機械工学科

\*\* 大学院生産機械工学専攻

\*\*\* 九州共立大学工学部

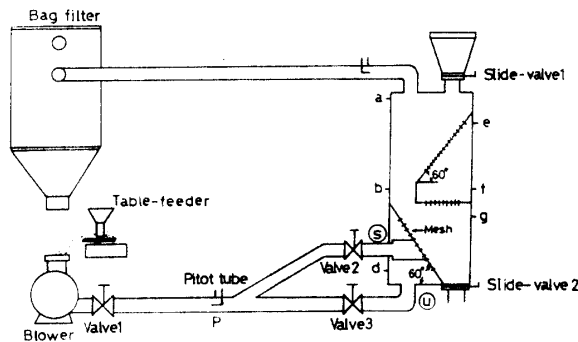
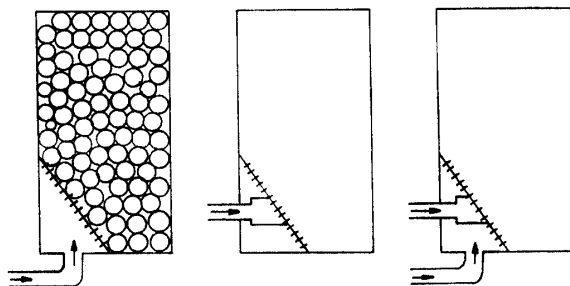


Fig. 1 Schematic diagram of Dust Collector.

クトに取付けられているバルブにより行った。風量は図中の記号 P で示される場所にピトー管を挿入し、測定される風速に管の断面積を乗じて算出した。

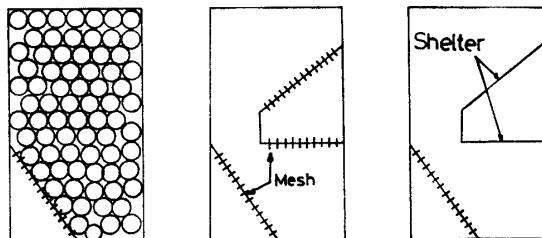
空気送込方法としては Fig. 3 に示すように三通りの方法で行った。即ち

- (1) ⑩からのみ送込
- (2) ⑤からのみ送込
- (3) ⑩+⑤から送込



① Air-Under ② Air-Side ③ Air-Both

Fig. 2 Sending method of Air to Dust Collector.



① Type 1 ② Type 2 ③ Type 3

Fig. 3 Internal forms of Dust Collector.

以後上記それぞれの流入方法を Air-⑩, Air-⑤, Air-⑩+⑤と呼ぶことにする。

移動層の容器には Fig. 2 に示すように巾 250 mm, 奥行 300 mm, 高さ 920 mm の角型容器を用いた。前

面にはアクリル板を設け内部の状態が観察できる構造となっている。流動時のフローパターンはマスフローとなっており、層内の流動状態はほぼ均一とみなされる<sup>4)</sup>。

角型容器の内部構造は Type 1, Type 2, Type 3 の 3 種の内部形状をとることが可能となっている。Type 1 は粒体の充填量が多くとれ、層内で粒子が均様に粉塵を捕集するとすれば、固定層においては長時間の集塵が可能となる。又この場合の集塵のメカニズムとしては層入口における衝突、内部では接触、さえぎり、拡散が考えられる。Type 2 は層中央部右方に台形状の網で囲まれた空間部が設けられており、空気はこの空間部に流通可能となっている。これは内部に空間を設け網を取付けることにより層入口と同様に衝突による集塵効果を狙ったものである。Type 3 は層内の空間部分に空気が入らないようにし、移動層における粒子と含塵ガスの向流接触（衝突）による効果を狙ったものである。こうして集塵における 3 つの Type について空気のみを流した時の圧力損失を調べた。

圧力損失は厳密には全圧差を考えるべきであるが、出口速度水頭は損失となることも多いうえに、回転気流などでは速度頭の算出が不可能であるため静圧差により圧力損失を求めた。静圧は層壁面の図中 a~f の位置に取付けられている静圧タップによりマンメータにて測定を行った。

実験は固定層、移動層の両層で行い移動層においては粒子の流出流量を 40 cm<sup>3</sup>/sec, 86 cm<sup>3</sup>/sec の 2 通りとした。なおこの流出流量の設定は Fig. 1 の層下部のスライドバルブにて行った。圧力損失は静圧タップ a と d の静圧差から算出した。充填粒子としてナイロンチップを使用した。Table 1 にその物性を示す。

Table 1 Physical properties of Nylon-chip

Particle shape	Cylinder	
Diameter	$d_p$	$d=0.264, h=0.252$ (cm)
Density	$\rho_p$	1.14 (g/cm)
Bulk density	$\rho_b$	0.73 (g/cm)
Angle of repose	$\alpha$	33.9 (deg)
Coefficient of internal friction	$\mu_j$	0.397 (—)
Coefficient of wall friction	$\mu_w$	0.306 (—)

3. 結果及び考察

3.1 固定層における圧力損失について

3.1.1 層内形状の違いによる影響について

Fig. 4 に層形状 Type 3 の装置のみの圧損と風量の関係を示す。図から装置のみの圧損は層内に粒子を充填した時の圧損に比べてかなり小さい値となっており、層内形状の違いによる圧損の差は無視できる程度のものであるとして以後の解析を進める。

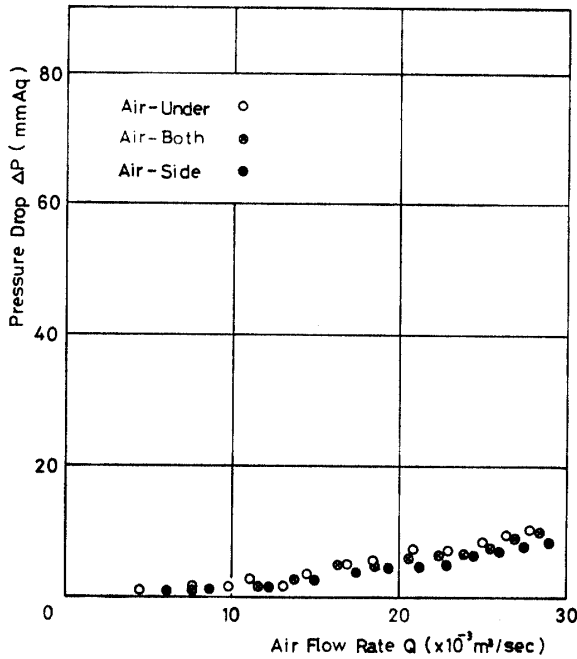


Fig. 4 Relation between  $\Delta P$  and  $Q$  (Type 3).

Fig. 5 に固定層における圧力損失と風量の関係を示す。図から圧力損失はほぼ風量の増加に比例して大きくなっていく。層形状の違いによる圧力損失の大きさについては空気の流入位置にかかわらず次の関係が成立つ。

$$\text{Type 3} > \text{Type 1} > \text{Type 2}$$

これは Type 3 の場合は空気の平均通過断面積が小さく空気流入に対する層の抵抗が一番大なるためである。又 Type 2 が最も小さいが、この形状は層中央部に空間部を有し、空気はこの部分に流入可能となっているため、Type 3 とは逆に層の抵抗が一番小さくなっているためである。

移動層および固定層において層断面を通じて流体の流通抵抗が均一でないと層内で流体の偏流が生じる恐れがある。偏流が生じると空気の流れに不均一の部分を生じ、空気が流れない個所が存在することになり、

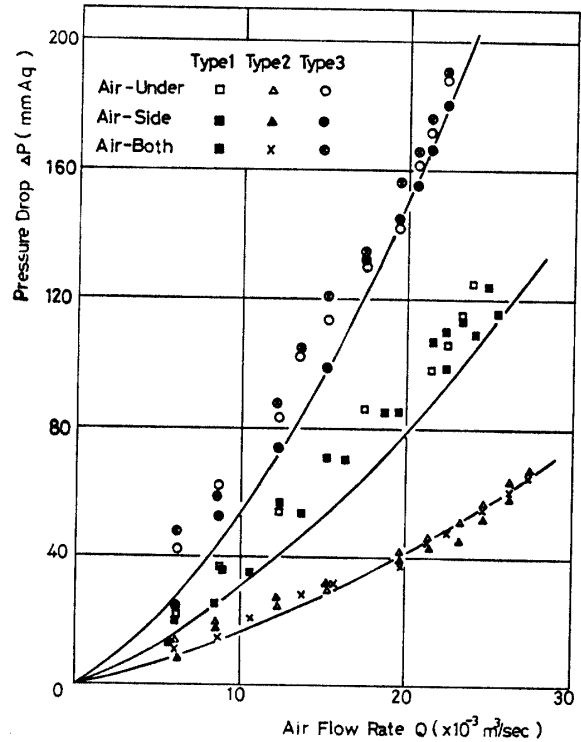


Fig. 5 Relation between  $\Delta P$  and  $Q$  (Fixed Bed).

集塵を行う際に層内の偏った部分でのみ集塵を行う結果となり、非常に好ましくない現象といえる。

Fig. 6 に固定層における各 Type において流量の変化による各層高における静圧の変化を示す。このグラフから固定層においては Type 1 の形状が圧力損失及び空気の均一流れという面から見ればもっとも集塵に適した形状だと言える。もっとも圧力損失だけの面から見れば Type 3 が一番小さい値を示しているが、Fig. 6 において静圧タップ b と f の間に差が余り見られないということは、とりもなおさず空間部分への空気流入量が多いことを意味し、結果として圧損が低くなっているが、流れとしては不均一流れと言える。従ってこの形状においては集塵をした際に高い集塵効率を得ることができるか否かが問題となってくる。

3.1.2 空気流入場所の違いによる影響

Fig. 6 に各 Type の静圧を示しているが、Type 1 の場合については Air-⊙と Air-⊙との間の静圧差はほとんどない、ということはこの Type においては両者の間の流れの状態は同じと考えることができる。Type 2 の場合は流量  $Q$  が  $Q > 22 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{sec}$  と  $Q < 10 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{sec}$  の範囲においてほぼ Air-⊙と Air-⊙は同じであるがその中間域では Air-⊙の方が若干大きくなっている。又 Type 3 においては Air-⊙に比べ Air-⊙の方が若干圧力損失が低くなっている。これは Air-⊙の方が空気流入に対する層の抵抗が小

さいためである。以上より固定層における層の内部形状の影響は顕著であり、圧力損失の大きさについては Type 2 が一番小さく、Type 1, Type 3 の順となった。又空気流入位置の変化による影響については Type 1 は全く変りなく、Type 2, Type 3 に若干の影響が見られた。

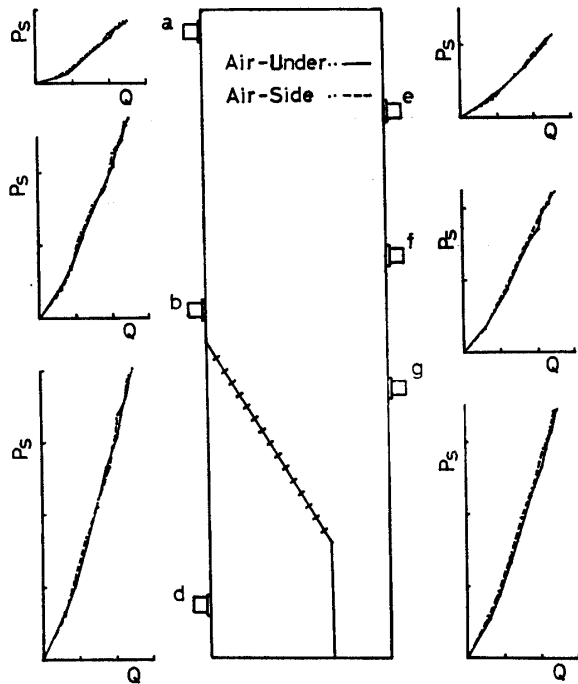


Fig. 6-1 Relation between  $P_s$  and  $Q$  (Fixed Bed).

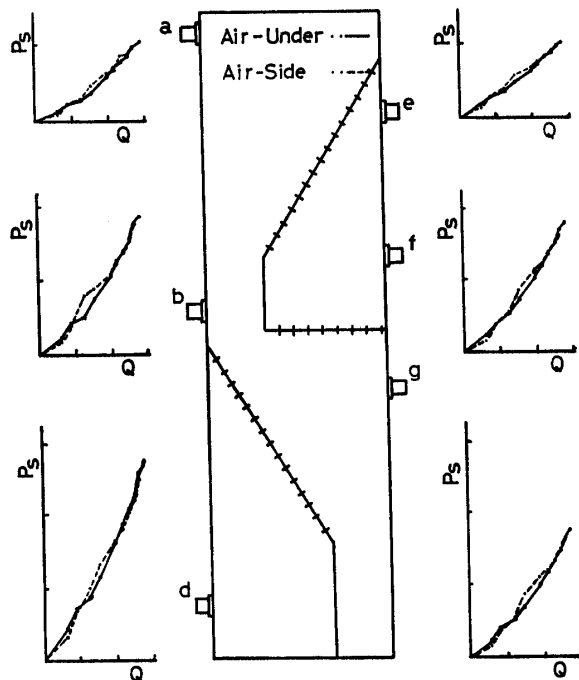


Fig. 6-2 Relation between  $P_s$  and  $Q$  (Fixed Bed).

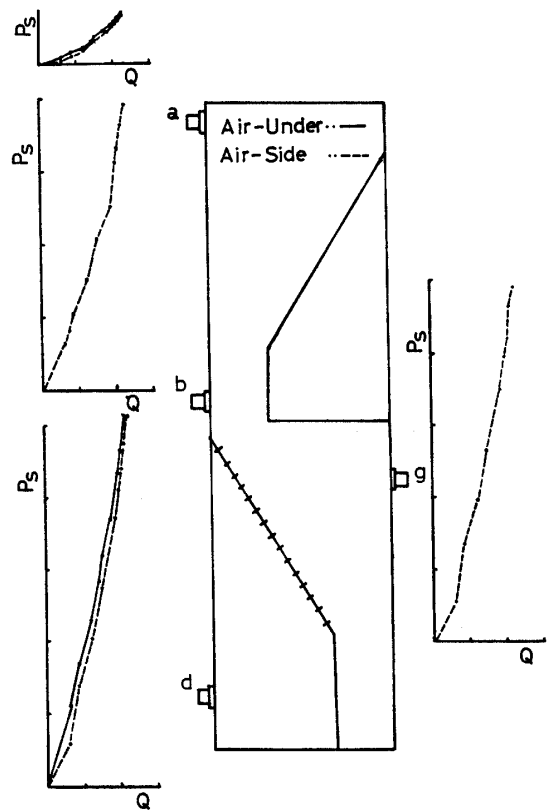


Fig. 6-3 Relation between  $P_s$  and  $Q$  (Fixed Bed).

#### 4.1.3 空隙率と Ergun<sup>2)</sup> 式の適用について

空隙率は固体の層を通る圧力損失に影響を与える重要な変数のうちの一つであり粉体又は粒体の充填の度合を表わすもので次のように定義される。

$$\text{空隙率} = \frac{\text{空隙の容積}}{\text{粉体の占める全容積}}$$

即ち空隙率  $\epsilon$  は次の式で表わせる

$$\epsilon = (\rho_p - \rho_B) / \rho_p$$

ここで

$\rho_p$ : 粉体の真密度

$\rho_B$ : 粉体のかさ密度

真密度は物質固有の値をもつが、かさ密度は容器の充填の方法により異なるものである。今回の実験による充填方法は容器頂部供給ホッパーからの重力流れによった。Table 2 に固定層の各 Type における空隙率の測定値および移動層における測定値を示す。空隙率は流体の速度、また移動層においては粒子の降下速度によっても影響される。

固定層の圧損については多くの実験式が提唱されており、中でも Ergun の式は層流域から乱流域まで広範囲にわたってよく一致するとされている。

圧力損失  $\Delta P$  は次式で表わされる。

Table 2 Void Fraction  $\epsilon$

	Fixed Bed	Moving Bed Q=40	Moving Bed Q=86
Type 1	$\epsilon=0.35$	$\epsilon=0.40$	$\epsilon=0.41$
Type 2	$\epsilon=0.39$	$\epsilon=0.42$	$\epsilon=0.43$
Type 3	$\epsilon=0.38$	$\epsilon=0.42$	$\epsilon=0.43$

$$\Delta P = 150L (u_0 \mu_f / d_p^2 g_c) (1-\epsilon)^2 / \epsilon^3 + 1.75L (u_0^2 \rho_f / d_p g_c) (1-\epsilon) / \epsilon^3$$

右辺第一項は粘性による摩擦損失が支配的となる層流項を表わしており、第2項は運動によるエネルギーの損失が支配的となる乱流項を示している。

ここで

$\Delta P$ : 圧力損失 ( $g \cdot wt/cm^2$ )

$L$ : 層高 (cm)

$d_p$ : 平均粒子径 (cm)

$g_c$ : 重力換算係数 ( $g \cdot cm/g \cdot wt \cdot sec^2$ )

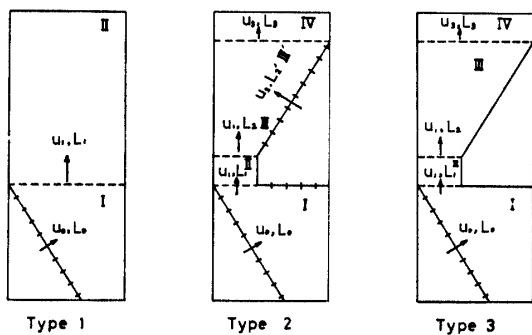
$u_0$ : 空塔風速 (cm/sec)

$\epsilon$ : 空隙率 (-)

$\mu_f$ : 流体粘度 ( $g/cm \cdot sec$ )

$\rho_f$ : 流体密度 ( $g/cm^3$ )

ナイロンチップの  $d_p$  はこれを同体積の球体とみなした時の粒径を求めこれを平均粒子径とした。今回のこの Ergun 式の適用に当っては各 Type について Fig. 7 に示すように層内をいくつかの領域に分け、各々について圧力損失を算出し、その和を装置全体の圧損として求めた。この結果を Fig. 5 の実線に示す。各形状とも若干のパラッキはあるが傾向としてはかなりの一致を見ることが出来る。実験値と理論値を比較してみると流量  $Q$  が大なるにつれ、実験値が下る傾向にある。この原因としては流量  $Q$  の増大に伴う空隙の増加を考慮することができる。Fig. 8 に圧力損失から Ergun 式により算出した空隙と流量の関係を示す。これから層の空隙が流量の増加につれて若干大きくなっているのがわかる。



$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$        $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_5$        $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4$

Fig. 7 Method of calculation of Pressure Drop.

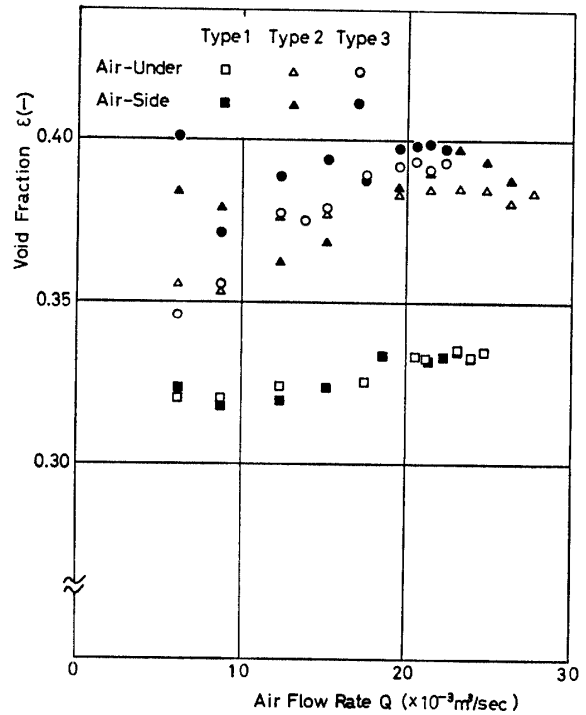


Fig. 8 Relation between  $\epsilon$  and  $Q$  (Fixed Bed).

### 3.2 移動層における圧力損失について

移動層の圧力損失については粒子流出流量  $Q_0$  について  $Q_0=40 \text{ cm}^3/\text{sec}$  および  $Q_0=86 \text{ cm}^3/\text{sec}$  の二通りについて実験を行なった。

#### 3.2.1 層形状および空気流入位置の影響について

Fig. 9, Fig. 10 に移動層における圧力損失と流量の関係について、また Fig. 11 に  $Q_0=86 \text{ cm}^3/\text{sec}$  の時の各部の静圧と流量の関係を示す。これらから移動層の場合においても固定層と同様に層の形状の違いというものは顕著に表われており、圧力損失の大きさはやはり  $\text{Type 3} > \text{Type 1} > \text{Type 2}$  の順となっている。また粒子流出流量の違いは流出流量  $Q_0=86 \text{ cm}^3/\text{sec}$  の方が圧損が小さくなっている。これは流出流量の増加に伴う空隙率の増大によるものである。次に空気流入位置の違いによる影響については、これも固定層の場合とほぼ同様の傾向を示しており、Type 1 については Air-⑤ と Air-⑩ はほとんど同じである。つまり移動層の場合においても Type 1 の形状については圧損は空気流入位置の影響を受けない。Type 2 についても両者の間にほとんど差は見られないが、Type 3 においては両者の間にはっきりとした差が表われ Air-⑤ が Air-⑩ に比べて低くなっている。この形状の移動層の場合粒子と流体は完全に向流接触となり、流入空気が Air-⑤ の場合降下粒子により下方に押し流されるためである。

固定層と移動層の違いについては、どの Type にお

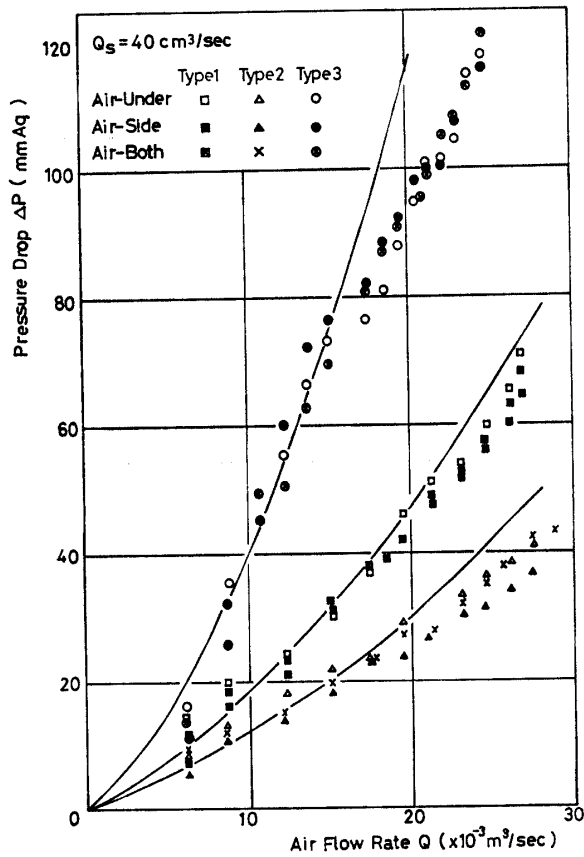


Fig. 9 Relation between  $\Delta P$  and  $Q$  (Moving Bed).

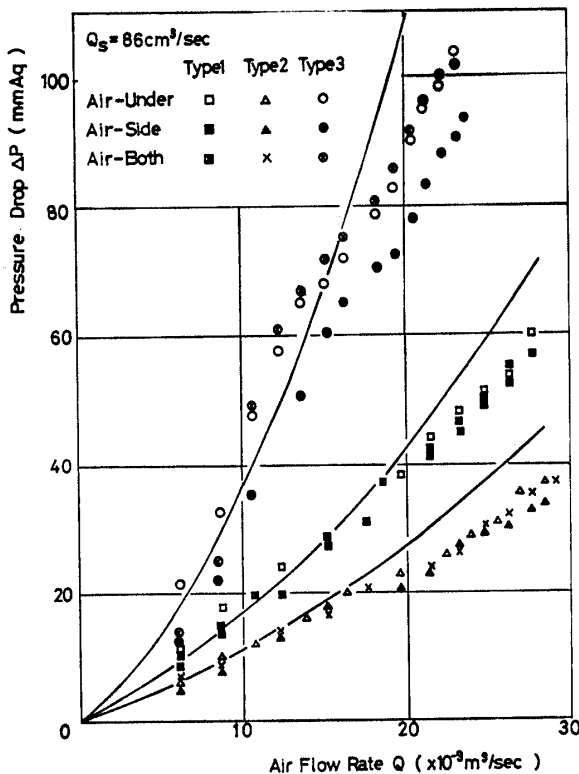


Fig. 10 Relation between  $\Delta P$  and  $Q$  (Moving Bed).

いても移動層の圧損は固定層のそれと比べてかなり低い値となっている。また空気の流れから見ると流量  $Q$  が小さい範囲においては移動層の場合一様流れに近い形になっていると考えられ、 $Q$  が増すにつれて固定層における空気の流れに近くなっていると考えられる。即ち Type 1 の形状においては固定層、移動層ともほぼ均一な流れと見なせ、Type 2, Type 3 については

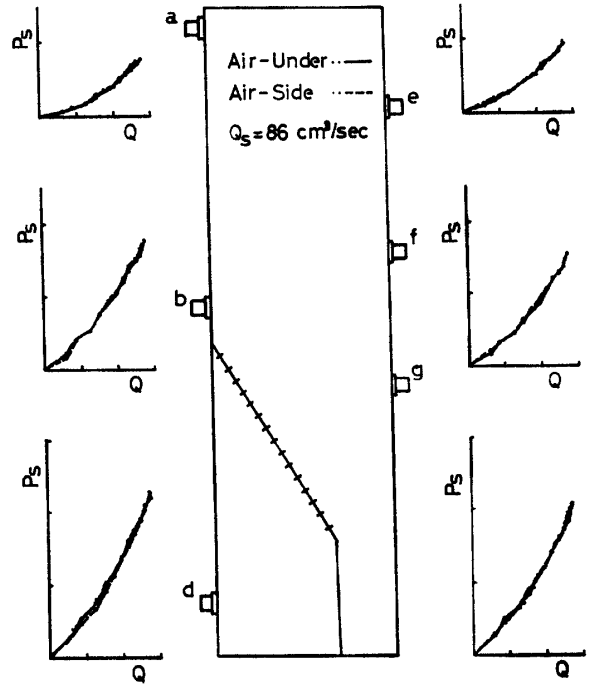


Fig. 11-1 Relation between  $P_s$  and  $Q$  (Moving Bed).

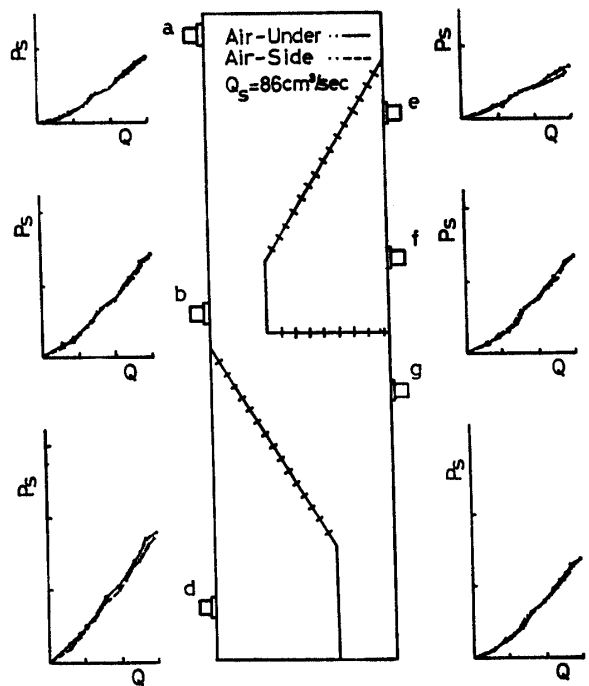


Fig. 11-2 Relation between  $P_s$  and  $Q$  (Moving Bed).

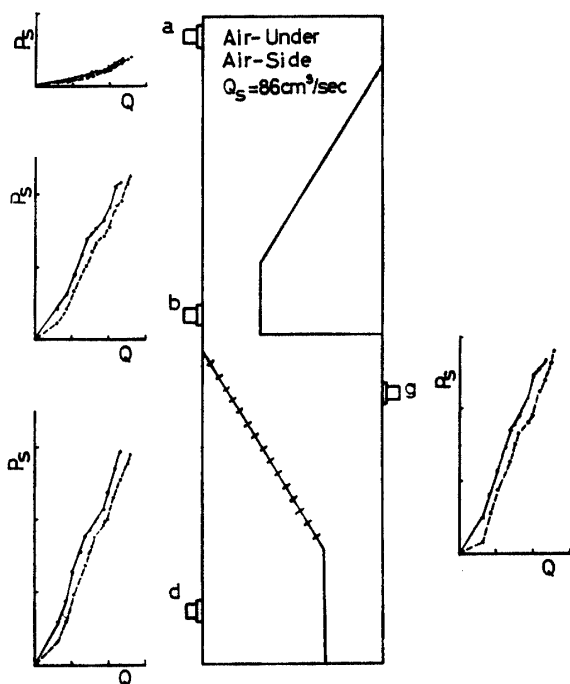


Fig. 11-3 Relation between  $P_s$  and  $Q$  (Moving Bed).

$Q < 8 \text{ cm}^3/\text{sec}$  ぐらいで均一流れに近いと見なせ、固定層において均一流れを得ようと思えばさらに  $Q$  が小なる必要がある。これらの装置の集塵への適用を考える場合まず集塵の条件、処理ガス風量、さらに集塵媒体の処理等を考慮する必要があり一概に形状を決めることはできない。

3.2.2 移動層における空隙と国井<sup>3)</sup>の式について

移動層において圧力損失  $\Delta P$  を算出するために Er-gun の式における空塔風速  $u_0$  のかわりに次式で表わされる  $\epsilon \Delta u$  を用いる

$$\epsilon \Delta u = u_0 + \epsilon u_s \quad \dots\dots(1)$$

ただし  $u_s$ : 粒子の降下速度 (cm/sec)

これは国井により提唱されているもので、移動層の場合の空塔風速は流体と粒子の間の相対速度で表わすことができる。移動層の場合も固定層で算出したと同様に層内をいくつかの領域に分けて圧力損失を算出した。その結果を Fig. 9, Fig. 10 に実線で示した。移動層の場合においても理論値と実験値はかなりの一致を示している。ただグラフを見てわかるように流量  $Q$  の増加につれて実測値が理論値曲線から次第に下っていく傾向にある。この原因は風量の増大に伴う空隙の変化及びナイロンチップ流出に伴う排出空気量の増大によるものと考えられる。

移動層における空隙の変化については固定層の場合と同様の方法にて算出した。Fig. 12 に流出流量  $Q_0 =$

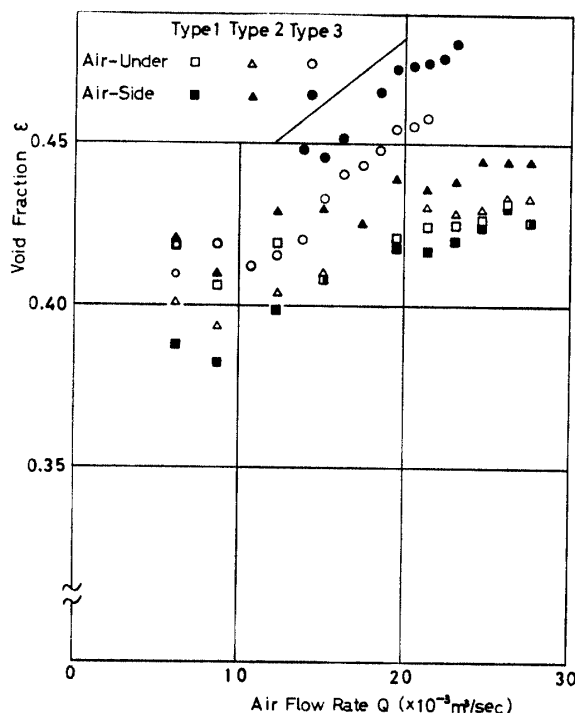


Fig. 12 Relation between  $\epsilon$  and  $Q$  (Moving Bed).

$86 \text{ cm}^3/\text{sec}$  の場合の流量  $Q$  と空隙の関係を示す。移動層における空隙も流量  $Q$  が増加するにつれて増大していることがわかる。又固定層と比べてその変化の度合いが大きい、この原因は先に述べたナイロンチップ流出に伴う排出空気量の増加を空隙の変化としてとらえたためである。先に移動層においては流量  $Q$  の増加に伴って実測値が理論値より徐々に下っていく傾向にあることを指摘し、これが空隙の増加とナイロンチップ流出に伴う空気量の増加によるものとしたが、次にこの排出空気量の増加について考えて見る。

Fig. 13 に層内の空気の流れについての模式図を示す。層下部より  $G_{IN}$  の空気が流入し、又ホップより粒子に伴って空気  $G_h$  が流入する。層出口における流出量を  $G_{OUT}$  とすると国井の実験によれば移動層において次の関係が成り立つとしている。

$$G_{OUT} = G_{IN} + G_h = A u_0 + A \epsilon u_s \quad \dots\dots(2)$$

$$G_{OUT} = A \epsilon \Delta u \quad \dots\dots(3)$$

ここで

$A$ : 層平均断面積 ( $\text{cm}^2$ )

この式によると粒子の降下速度が大きくなると空気の下流流れが生じないことになる。ここで粒子流出流量設定用バルブ 2 (Fig. 1) を  $Q_0 = 86 \text{ cm}^3/\text{sec}$  とするように設定し、流出ホップは粒子が排出しないよ

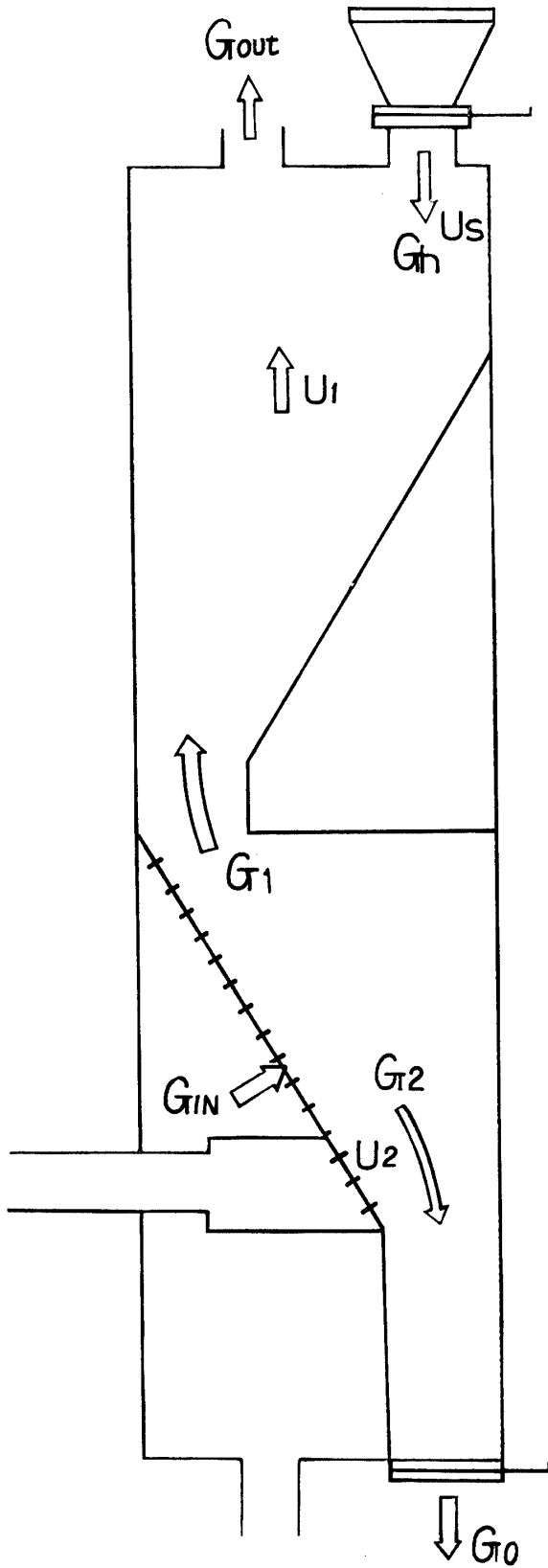


Fig. 13 Flow model in Moving Bed.

う金網で蓋をし、空気のみを流出を許すようにした。この時の圧力損失と流量の関係について前述の固定層、

移動層の実験結果と合わせ Fig. 14 に示した。このグラフから本実験装置の場合、粒子が排出されない場合においても圧損は固定層の場合と比較し少し小さい値となっている。しかも固定層の圧損  $\Delta P_f$  と今回の測定における圧損  $\Delta P_m$  の差  $\Delta P_{f-m}$  は流量  $Q$  が増すにつれて大となっている。即ちこのことは層下部から空気が流出していることを表わしている。そしてこのことが移動層の圧損において流量  $Q$  の増加につれて実測値が理論曲線から徐々に離れていく大きな原因となっている。従って移動層における空隙の変化の度も実際は固定層の場合と似たようになることが予想される。

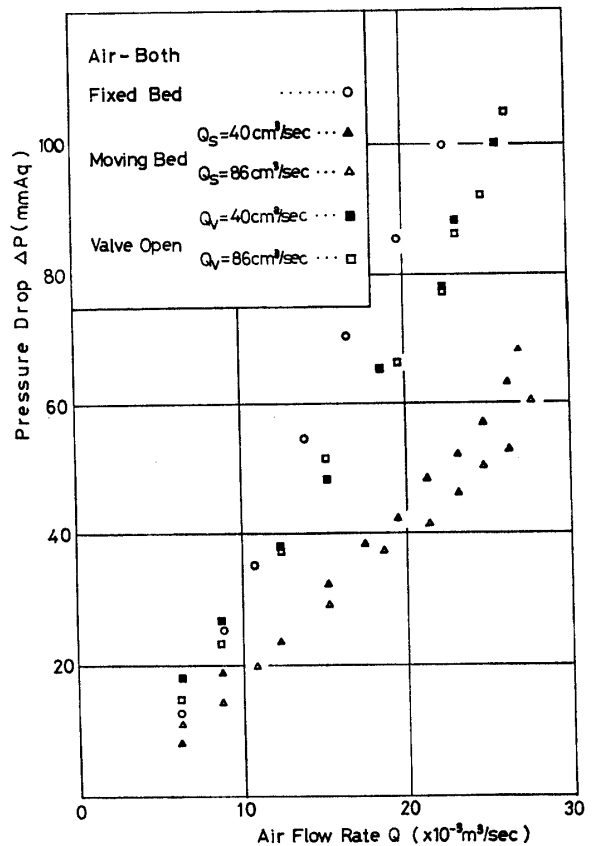


Fig. 14 Relation between  $\Delta P$  and  $Q$  of Type 1.

以上から本実験における空気の流れは次式で表現できる (Fig. 13 参照)

$$G_{IN} = G_1 + G_2 = Au_1 + Bu_2 \quad \dots\dots (4)$$

$$G_{OUT} = G_h + G_1 = A\varepsilon_1 u_s + Au_1 \quad \dots\dots (5)$$

$$G_0 = G_2 = BU_2 \quad \dots\dots (6)$$

ここで

$G_{IN}$  : 流入空気量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

$G_1$  : 流入空気量のうち層出口から流出する空気量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )



- $G_2$  : 流入空気量のうち層下部ホッパーから流出する空気量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  
 $G_h$  : 供給ホッパーより流入する空気量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  
 $G_{out}$  : 層出口からの流出空気量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  
 $G_0$  : 層下部からの流出空気量 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )  
 $U_1$  :  $G_1$  の空塔風速 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )  
 $U_2$  :  $G_2$  の空塔風速 ( $\text{cm}/\text{sec}$ )  
 $A$  :  $G_1$  通過部の層内平均断面積 ( $\text{cm}^2$ )  
 $B$  :  $G_2$  通過部の層内平均断面積 ( $\text{cm}^2$ )

(4) 式における  $G_2$  は層の形状, 流入空気量により定まるものであるが,  $G_2$  を測定することにより, (5) 式の  $G_{out}$  を算出することができる. 今回の移動層への国井の式の適用にあたっては, 固定層における空塔風速  $u_0$  の代わりに (1) 式で表わされる相対速度  $\epsilon \Delta u$  を用いたが, 実際には層下部よりの空気の流出を考慮した (5) 式の  $\epsilon \Delta U = \epsilon_1 U_s + U_1$  を用いればより正確に圧力損失を表わすことができる.

#### 4. 結 論

移動層および固定層における圧力損失を調べた結果以下のことに要約できる.

- (1) 本実験において固定層, 移動層における空気の流れの状態をある程度解明できた.
- (2) 固定層, 移動層における圧力損失は層内形状

に大きく左右され, 今回行った層形状の違いによる圧力損失に次の関係がある.

Type 3 > Type 1 > Type 2

- (3) 空気流入位置による影響は余りなく, ただ移動層における Type 3 に影響が現われる.
- (4) 固定層, 移動層とも空気の流量  $Q$  が増大するにつれて空隙も増大する.
- (5) 固定層の圧力損失は Ergun 式で表わすことができ, 実験値との間にかんがりの一致を見ることができた.
- (6) 移動層において空気が層下部から流出することを考慮に入れた時の空気の流れの関係式を示した.

終りに本実験については本学卒業生, 青柳講治君, 清田徹英君, 森崎恒夫君の協力で行なわれたことを記し, 感謝します.

#### 参 考 文 献

- 1) G.C. Egleson, H.P. Simons, L.J. Kane and A.E. Sands: Ind. Eng. Chem. **46**, 1157 (1954)
- 2) S. Ergun: Chem. Eng. Progr. **48**, 89 (1952)
- 3) Sok Moon Yoon and Daizo Kunii: Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop. **9**, 559 (1970)
- 4) 早野, 山中, 上滝: 山口大学工学部研究報告, **27**, 235 (1977)

(昭和 54 年 4 月 16 日 受理)