

## 論 文

## 向流移動層における圧力損失\*

天辰正義\*\*・全 明\*\*\*・吉沢昭宜\*\*\*\*・館 充\*\*\*\*

## Pressure Drop in Countercurrent Moving Bed

Masayoshi AMATATSU, Myong CHON, Akinori YOSHIKAWA, and Mitsuru TATE

## Synopsis:

To analyze some primary factors that determine the driving rate of the blast furnace, the characteristics of pressure drop in the countercurrent moving bed were studied.

The following results were obtained:

1. The flow of particles seemed to be the piston flow up to channeling state.
2. The Ergun's equation could be applied to the pressure drop of room temperature blast up to channeling state.
3. The differences of the characteristics between fixed bed and moving bed were observed to be in,
  - (1) the packing state in the upper parts of packed column,
  - (2) the process of the development of channeling state.
4. The observed pressure drop of the hot blast was a little higher for lower air velocity, but a little lower for higher air velocity than that of cold blast at the same velocity. The Ergun's equation could also be applied to the pressure drop of hot blast up to channeling state.

(Received Oct. 21, 1971)

## 1. 緒 言

これまでの充填層におけるガス圧力損失に関する研究は、そのほとんどが固定層について行なわれた<sup>1)~3)</sup>。

充填された固体粒子が連続的に供給されて、常に一定の層高を保つと同時に粒子群の下方流れとは逆に流体が下部から送入上昇する、いわゆる向流移動層における圧力損失に関する研究は少ない<sup>4)</sup>。

固定層と移動層とにおける圧力損失の差異を評価することは、溶鉱炉々内とくにシャフト部における通気性の解析には重要な問題であるばかりでなく、溶鉱炉の操業度の向上に必要な条件である。ここに向流移動層における圧力損失に関する研究を試み、その結果を得たので報告する。

## 2. 実 験

## 2.1 実験条件

従来の諸家の研究において、充填層の固体粒子が流体の圧力損失に影響を及ぼす因子として粒子径、粒子形状および層空隙率などが指摘されている。

本実験においては、固体粒子として焼結鉍（平均粒子

径=0.75, 1.5, 2.5, 4.38, 5.38 mm  $\phi$ ）とガラスビーズ（平均粒子径=0.86, 1.71 mm  $\phi$ ）とを、流体として常温と高温（充填層入口温度が 270°C と 480°C）の空気を使用した。なお圧力損失に対する壁効果が無視できるように粒子径の範囲を充填管内径の約 1/20 以下とした。粒子の降下速度の範囲は操業中の高炉々内の荷の降下速度の範囲に近い値を採用した。その値の範囲は 0~47 mm/min であった。

圧力損失の特性を求めるにあたって流体の流速を層流域から乱流域までの広い範囲にわたって変えて実験を遂行することが望ましい。しかしながら実験装置の規模すなわち送風機および移動層装置などの制約から、送風量は 100~900 Nl/min（空塔速度で 22~200 cm/sec）の範囲であった。

## 2.2 実験装置および方法

本実験において使用した実験装置のプロシットを Fig.

\* 昭和43年10月本会講演大会にて発表  
昭和45年10月21日受付

\*\* 東京大学工学部

\*\*\* 東京大学大学院

\*\*\*\* 東京大学工学部 工博

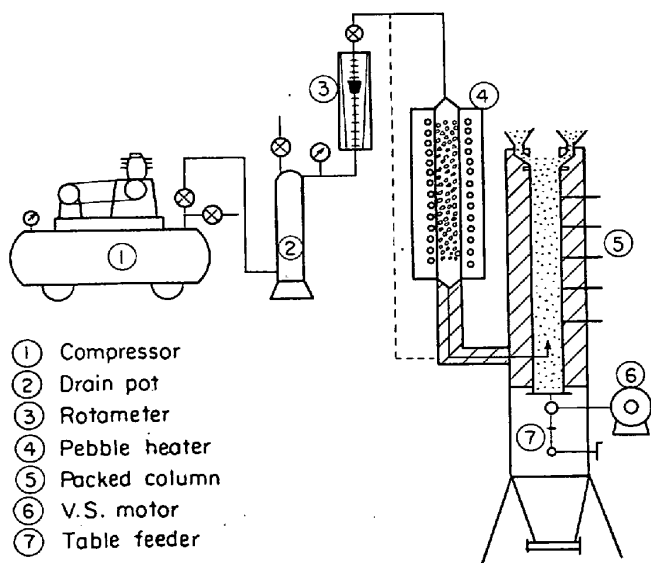
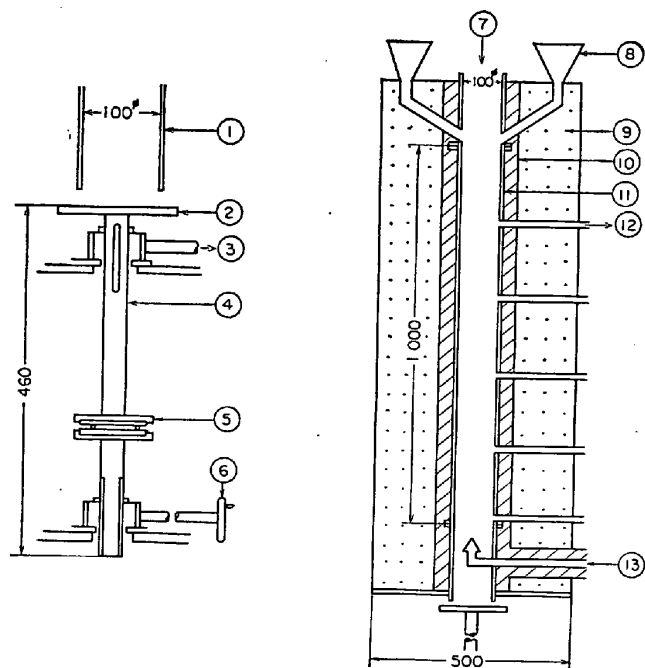


Fig. 1. Flowsheet of experimental apparatus.



①100φ Stainless steel pipe ②Turntable ③To v.s. motor  
 ④Shaft ⑤Thrust bearing ⑥Handle ⑦Thermocouple  
 ⑧Hopper ⑨Brick ⑩Asbestos yarn ⑪Packed column  
 ⑫To manometer & thermocouple ⑬Air blast

Fig. 2. Experimental apparatus.

1に示す。実験装置は排出装置，装入装置および送風機などからなる。

#### (1) 固体粒子の排出装置

従来の実験室的研究に用いられた移動層装置の排出機構はゲートバルブあるいはそれに類似したものが多く<sup>4)5)</sup>。このような機構では，焼結鉾のように形状が複雑で粒子径がさまざまな試料について，連続かつ一様でしかも任意の降下速度を得ることは困難がある。本研

究では Fig. 2 に示すように，テーブルの回転と昇降を行なうことによつて任意かつ一様な粒子降下速度を得た。

テーブルの回転数は可変速モーターとウォームギアによつて，テーブルの昇降はハンドル⑥を操作して行なう。テーブルの回転数はモーターの回転数の1/90とした。またテーブルより下部の機構に粒子が噛み込まないように鉄板の覆を取り付けた。ハンドルおよびテーブルの回転軸には3本のO-リングを取り付けたので，十分に気密が保たれた。

#### (2) 固体粒子の装入装置

装入装置としては充填管の鉛直上方に取り付けたホッパーから粒子を降下させる形式のものがある<sup>5)</sup>。このような装入方式では，ホッパー内の荷重が充填層内の荷重分布に影響を及ぼすと考えられる。したがつて本実験においては粒子の流れ方向を変えることによつて，ホッパー内の荷重が充填層内の荷重分布に影響を及ぼさないように，Fig. 2 に示すようなホッパーを製作した。

#### (3) 充填管と圧力および温度測定孔

充填管には内径100mmφ，高さ1000mmのステンレス耐熱鋼(SUS-42)管と同サイズのガラス管とを使用した。ステンレス耐熱鋼製の充填管は層内の圧力および温度の測定に，ガラス製の充填管は粒子の降下状況，その速度ならびに相互の運動などの観察に用いた。高温送風の場合には充填管からの放熱をできるだけ少なくするため，アスベストヤーンを厚さ3cm巻き，さらに50cmの角柱になるように断熱煉瓦を巻いた。

層を高さ方向に5分割し，ストックラインから27, 47, 67, 87, 104cmの位置に内径6mmφのステンレス耐熱鋼製のパイプを取り付けた。これらのパイプにより各層の圧力および温度の測定を行なつた。圧力の測定は水柱および水銀柱によつて，温度の測定は定点補正された熱電対(CA線，0.65mmφ)を圧力測定孔と炉頂とから挿入して行なつた。充填層の熱的定常状態を充填層上段の温度が約1hr以上一定になつたときとした。定常状態に達するまでの時間は送風量および粒子降下速度などによつて異なつたが，およそ5~10hrを要した。炉頂出口は大気放出になつているので，炉頂ガス圧力は大気圧に等しいとみなすことができる。

#### (4) 送風機および加熱装置

層内への空気送入はコンプレッサー(最大送風量1.2Nm<sup>3</sup>/min)によつて，送風量の測定はロータメータ(測定範囲300~1000Nl/min)によつて行なつた。高温送風の場合の空気の加熱はペブル加熱炉(最大出力20kWH)によつて行なつたが，装置の安全性と焼結鉾の酸化防止

を考慮して層入口空気温度が 270°C と 480°C とに保持されるように加熱炉の出力を調整した。

常温および高温の空気が層内へ均一に送入されるように、径 2.5 mm φ 中の孔を約 40 個あけた円錐形羽口 (コーン) を充填管下部の中心位置に溶接によつて取り付けられた (Fig. 2 参照)。

### 2.3 予備実験

層内の流体および粒子の混合が圧力損失に影響を及ぼすと考えられる。しかし層内の流体混合に関する報告<sup>6)</sup>によると、粒子が単味の場合その影響は無視できるとされている。一方移動層における粒混合に関する報告<sup>7)</sup>によると、管壁の第一層を除いて粒子群の流れはピストン流れであるとされている。向流移動層における圧力損失に及ぼす粒子群混合の影響についての報告はないので、粒子群流れの観察および空隙率の測定を次のように行なった。

スプレーペイントで着色した粒子をトレーサーとして、一定時間ごとに塔頂から均一に装入する。一定高さまで降下したとき粒子の降下および送風を停止する。次にガラス製充填管内の粒子を吸い上げるが、その際にトレーサー粒子を吸い上げないように留意し、トレーサー粒子層の形状を観察する。一方、一定層高の粒子重量測定を行ない、層の空隙率を算出した。これを観測値として Table 1 に示す。粒子の密度測定は表面積比較法およびアルキメデス法によつた。なお空隙率の計算値については後述する。その結果、吹抜現象 (チャンネルングまたはバブリング) が生じない流速範囲では粒子群の流れはピストン流れであり、顕著な混合は見られなかった。このような流速範囲で測定した空隙率および粒子密度を Table 1 に示す。流速が増大して層内に吹抜現象が生じる流速範囲では粒子の混合が見られた。したがつてこの流速範囲では粒子混合が圧力損失に影響を及ぼすものと考えられる。

Table 1. Density of particles and void fraction in moving bed.

| Particles     | Diameter mm φ | Density (g/cm <sup>3</sup> ) |      | Void fraction |      |
|---------------|---------------|------------------------------|------|---------------|------|
|               |               | Solid                        | Bulk | Obs           | Cal. |
| Sintered ores | 0.75          | 4.40                         | 2.06 | 0.53          | 0.39 |
| "             | 1.50          | 4.35                         | 2.13 | 0.51          | 0.39 |
| "             | 2.50          | 4.34                         | 2.24 | 0.48          | 0.41 |
| "             | 4.38          | 4.27                         | 2.17 | 0.48          | 0.39 |
| "             | 5.38          | 4.28                         | 2.17 | 0.49          | 0.39 |
| Glass-beads   | 0.86          | 2.50                         | 1.48 | 0.41          | 0.41 |
| "             | 1.71          | 2.50                         | 1.52 | 0.39          | 0.35 |

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 圧力損失と流速との関係

圧力損失を縦軸に流速を横軸にそれぞれ両対数方眼紙にプロットすると、それらはほぼ比例関係にあることが明確に示されるだけでなく、圧力損失の特性が最もよく理解される。したがつて以下において、本実験結果をこの圧力損失曲線で整理し図示する。

固定層 (全層高 104 cm) における単位層高当たりの圧力損失 (cm/H<sub>2</sub>O) と流速 (cm/sec) との関係を各粒子について Fig. 3 に示す。Fig. 3 より流速が小さい範囲では、曲線の勾配は 1 に近く、流速が増大すると曲線の勾配は 2 に近づくことがわかる。中間部は粒径によつて異なるが、ほぼ一定の勾配をもつ曲線もある。曲線の勾配は流速と粒度とに大きく依存している。粒度と曲線の勾配との関係は Fig. 3 より求められる。この結果を Table 2 にまとめた。

層流領域での層内の圧力損失式として、BLAKE-KOZ-ENY の実験式

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = \frac{150 \mu f u}{D_p^2} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \dots\dots\dots (1)$$

また乱流領域における圧力損失式として、BURKE-PLUMMER の実験式

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = \frac{1.75 \rho f u^2}{D_p} \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \dots\dots\dots (2)$$

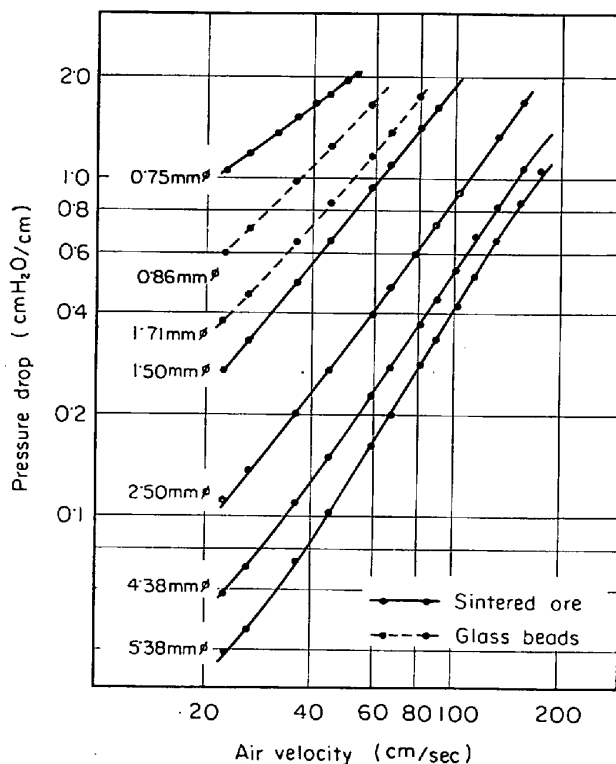


Fig. 3. Pressure drop in fixed bed.

Table 2. Dependence of the gradient of pressure drop curve in Fig. 3 on particle diameter and Reynolds number range.

| Particles     | $D_p$ (mm $\phi$ ) | Gradient | Reynolds number | Air velocity (cm/sec) |
|---------------|--------------------|----------|-----------------|-----------------------|
| Sintered ores | 0.75               | 1.20     | 26~44           | 49~82                 |
| "             | 1.50               | 1.38     | 45~115          | 42~107                |
| "             | 2.50               | 1.50     | 80~230          | 45~129                |
| "             | 4.38               | 1.69     | 140~470         | 45~136                |
| "             | 5.38               | 1.69     | 170~580         | 44~151                |
| Glass beads   | 0.86               | 1.08     | 27~35           | 44~57                 |
|               | 1.71               | 1.40     | 60~100          | 49~82                 |

が表わされている。(1)式は摩擦損失を、(2)式は動圧損失を表わす。S. ERGUN は固定層内の圧力損失式(3)を(1)式と(2)式の和で表わした。係数は数多くの実験によつて得られた値である。一方本実験結果から、吹抜現象が生じない流速範囲において、固定層の圧力損失と移動層のそれとは一致している。

したがつて固定層における圧力損失について諸家の実験結果を S. ERGUN<sup>1)</sup>が検討し誘導した式

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = \frac{150\mu_f u}{D_p^2} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} + \frac{1.75\rho_f u^2}{D_p} \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \dots\dots\dots (3)$$

が層流領域、乱流領域あるいは中間の遷移領域において移動層における流体の圧力損失を十分に表現している。ただし本実験における  $Re$  数の範囲は遷移領域に含まれるので、 $Re$  数の大きい乱流領域についてはさらに実験が望まれる。

3.2 ERGUN の式から推算した空隙率と実測値との対比

層内における流体の圧力と密度との変化を考慮し、温度、粘度および空隙率は一定と仮定すれば、(3)式は(4)式のように書ける。

$$\frac{(P_2 - P_1)}{L} \cdot g_c^2 = \frac{300\mu_f}{D_p^2} \cdot \frac{TP_0 u_0}{T_0} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} + \frac{3.50}{D_p} \cdot \frac{TP_0 \rho_0 u_0^2}{T_0} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \dots\dots\dots (4)$$

空隙率  $\epsilon$  をパラメータとして、(4)式右辺の値を求め圧力損失値  $(P_2 - P_1)/L$  を算出する。この結果と充填層における圧力損失の実測値とを同図にプロットすると充填層の空隙率が得られる。その一例が Fig. 4 である。このようにして得られた空隙率を計算値として Table 1 に示した。密度測定の際、焼結鉍中の貫通した気孔部分が含まれるので実験値が計算値より大きくなっている。Fig. 4 から明らかなように、低流速範囲では空隙率の小さい値において、流速の増大に伴つて空隙率の大きい値において圧力損失の実測値と計算値とが一致する。これは粒

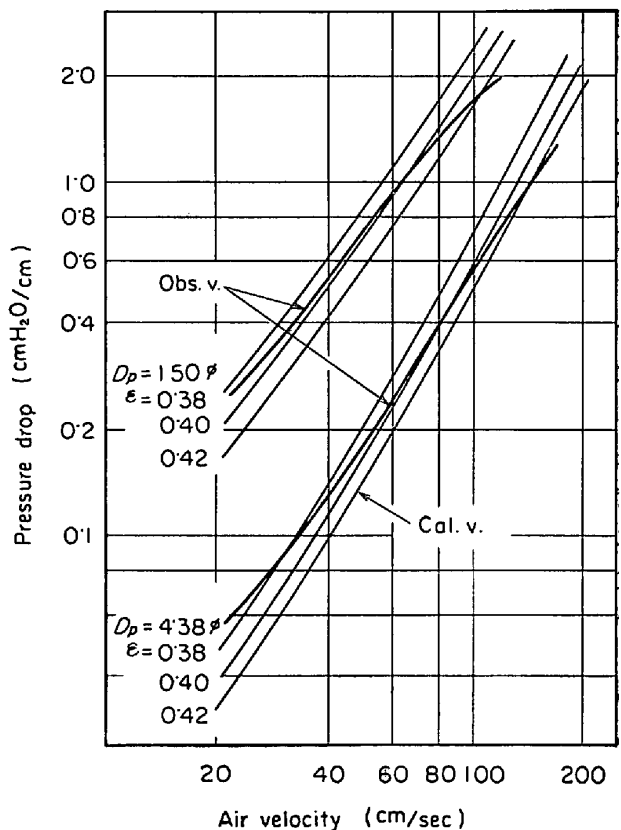


Fig. 4. Pressure drop in moving bed.

子径が小さいか、密度が小さく流動開始最小速度が小さい試料について明瞭に現われる。流速の増大に伴つて層内では徐々に吹抜現象が生じ始めるので、全流速範囲において空隙率を一定として取り扱うことには困難があり、他の観点からも空隙率あるいは圧力損失値を評価すべきであろう。今流速の増大に伴つて空隙率が大きくなるものとすれば、吹抜現象が生じる流速範囲では数パーセント層が膨張していることになる。事実ガラス製の充填管による実験で、約 1 cm の層の膨張が観察された。

3.3 粒子充填特性の圧力損失への影響

層 (全層高 104 cm) を 5 分割しストックラインから下部へ第 1 層 (層高 27 cm)、第 2 層 (20 cm)、第 3 層 (20 cm)、第 4 層 (20 cm)、第 5 層 (17 cm) とする。各層における単位層高当たりの圧力損失と流速との関係を Fig. 5 と Fig. 6 に示す。Fig. 5 は固定層、Fig. 6 は移動層に関するものである。図中曲線の左下に示した数字は各層の位置を示す。図から明らかに固定層第 1 層における圧力損失値が他の層と比較してやや低目である。一方移動層における各層の値はほとんど一致している。

層内の応力分布の測定結果が Jansen の理論式<sup>9)</sup>

$$P_w = \frac{D\gamma}{4\mu_w \kappa} \left\{ 1 - \exp \left[ (-4\mu_w \kappa / D) \cdot L \right] \right\}$$

に近い報告<sup>9)</sup>がある。それによると、充填管径の数倍の

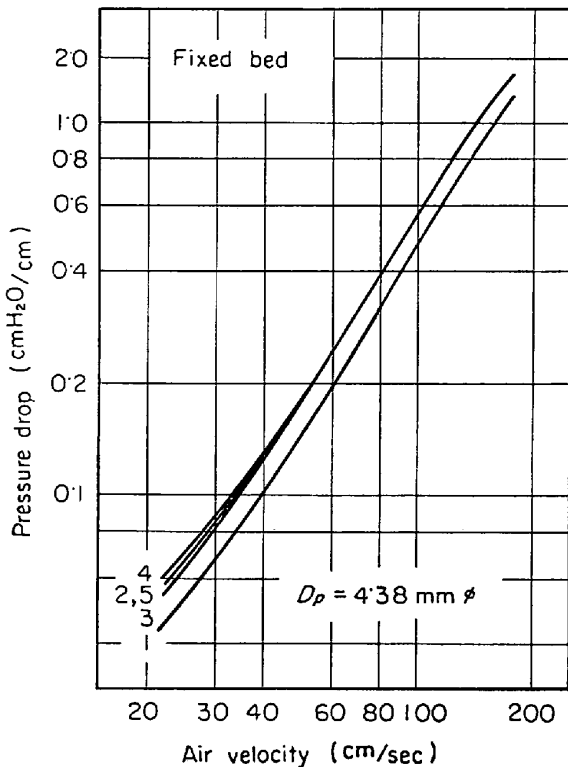


Fig. 5. Pressure drop in fixed bed.

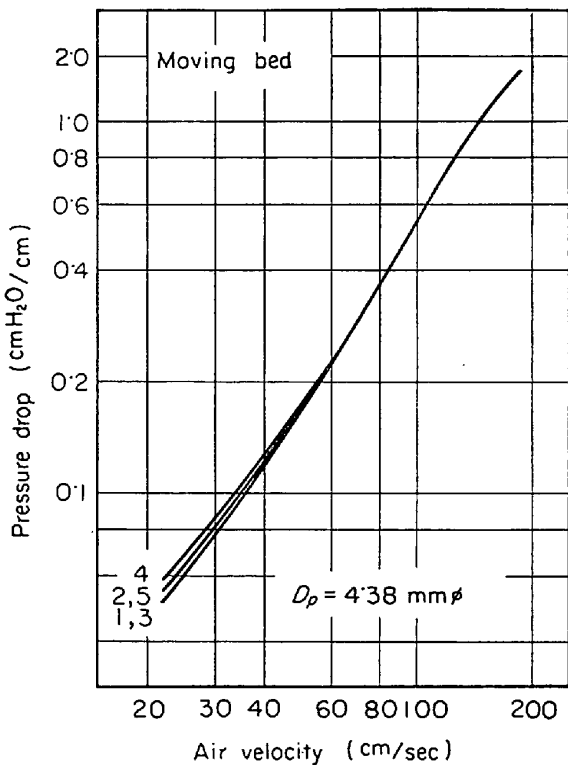


Fig. 6. Pressure drop in moving bed.

深さ以上では応力分布はほぼ一定になることが示されている。したがって層内では粒子形状の不規則性およびその性質によつてアーチやブリッジが形成されると考えら

れる。第1層ではアーチやブリッジは自重に耐えるが、第2～5層では荷重のためくずれる。しかしながらこれらの層では応力分布が一定であるため粒子群の配列は変化しないと考えられる。ところが移動層では上部で形成される疎な配列は、粒子が下方へ運動しているため直ちに安定な配列となつて降下する。したがつて移動層における各層の圧力損失値には差異が現われないと考えられる。こうして固定層と移動層との充填特性の差異は層上部にあるといえる。

3.4 固定層および移動層における圧力損失曲線

第2～5層(層高 60 cm)における単位層高当たりの圧力損失と流速との関係を粒度および降下速度をパラメータとして、固定層および移動層における圧力損失曲線を Fig. 7 に示す。図中曲線の右上数字は粒子降下速度 (mm/min), 曲線左の数字は粒子径 (mm φ) を示す。固定層と移動層とにおける圧力損失曲線を対比してみる。各粒度において、吹抜現象が生じない流速範囲では固定層と移動層の曲線は全く一致している。しかし流速が増大して層内で吹抜現象が生じる流速範囲では固定層と移動層とは異なつた傾向を示す。すなわち固定層では流速の増大に伴つて曲線の勾配は徐々に近づき、さらに流速が増大すると圧力損失は最大値を示し、一時層が膨張する。次いで層は流動状態に移行する。一方移動層では吹抜現象が生じ始める流速段階から曲線の勾配はそれ

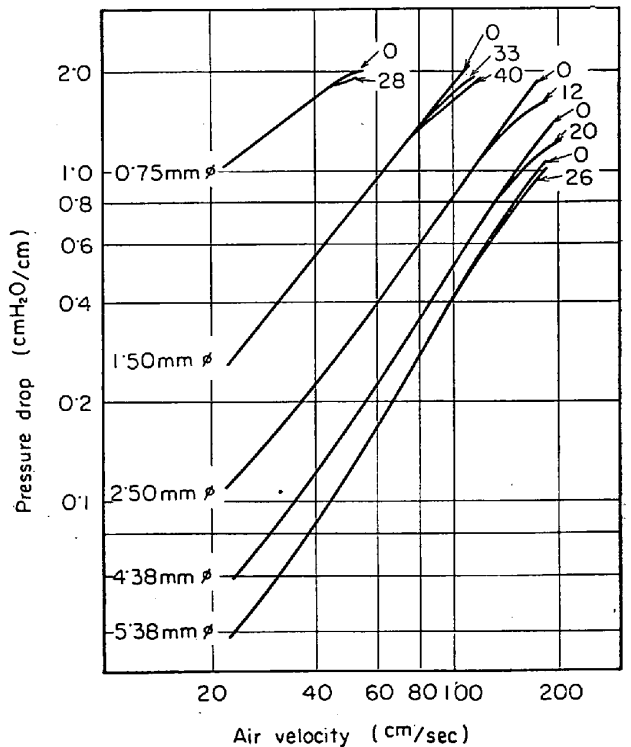


Fig. 7. Pressure drop in fixed bed and moving bed.

までの値より小さくなり飽和値に達する。層内では吹抜現象が生じそれが層全体に広がる。このような層内の粒子および気泡の挙動はガラス製の充填管を用いた観察によつても認められた。したがつて層の流動状態への移行過程が固定層と移動層とにおける圧力損失曲線の差異として現われたものと考えられる。

### 3.5 高温送風の向流移動層における圧力損失

高温送風の向流移動層においては、層の高さ方向の温度分布および圧力分布が送風量と粒子降下速度とによつて変化する<sup>10)</sup>。圧力測定孔の位置において、温度および圧力が測定されているので各層の温度と圧力とをその層上下の測定値の相加平均とし、各層における空塔速度を算出した。圧力損失の測定値と流速との関係を Fig. 8 に示す。図中黒丸点が実測値を示す。試料として、粒子径が 1.5 および 2.5 mmφ の焼結鉄を装入し、流体として空気を層入口温度が 270 および 480°C になるように加熱送風した。1.5 mmφ の粒子降下速度は 0, 4.5, 5.7, 6.5, 9.0, 10 (mm/min) で、送風量は 100, 160, 200, 240, 300 (Nl/min) であった。2.5 mmφ の粒子降下速度は 0, 5, 7, 8, 10.7 (mm/min) で、送風量は 100, 200, 300, 400 (Nl/min) であった。粒子降下速度、送風量および層入口ガス温度のそれぞれの組み合わせにおいて実験を行なつた。

Fig. 8 中の実線は空気温度が 25 および 500°C における圧力損失を ERGUN の実験式から算出した結果を示す。計算において空気の粘性係数の温度依存性については SUTHERLAND の式

$$\mu_f = 1.503 \times 10^{-5} \cdot \frac{T^{3/2}}{T + 123.6}$$

を用いた。これからわかるように高温送風の場合も ERGUN の式が実験値とよく一致する。高流速側では流動の発生のため一致しなくなる。

常温送風と高温送風の測定結果 (Fig. 7 と 8) を比較すると吹抜現象が生じない流速範囲の同一流速において、圧力損失値は高温送風における測定値がやや大きいかほぼ等しい値を示していることがわかる。流速が増大して、吹抜現象が生じる流速範囲の向流移動層における圧力損失値は高温送風についても常温送風と同様に飽和値に達する傾向を示す。また高温送風の値がやや小さい値を示している。この結果は計算結果と同様の傾向を示すことが Fig. 8 からわかつた。

## 4. 結 言

向流移動層における圧力損失の測定によつて次のことがわかつた。

1. 粒子群 (単味) の流れは、吹抜現象が生じない流速範囲ではピストン流れであり、吹抜現象が生じる流速範囲では粒子の混合が観察された。
2. 向流移動層における常温送風の圧力損失式として ERGUN の実験式が層内において吹抜現象が生じない流速範囲で適用される。
3. 固定層と移動層との差異は次の点に見られた。
  - (1) 充填層上部における充填特性
  - (2) 吹抜現象の発生過程とそれに伴う圧力損失値
4. 高温送風の圧力損失値は、常温送風と同一ガス流速において低流速範囲では常温送風の圧力損失値よりやや高い値であるが、吹抜現象が生じる流速範囲ではやや低い値となつた。吹抜現象が発生しない流速範囲では高温送風の圧力損失式として ERGUN の実験式が適用される。

### 記 号

- $D$  : 充填管径 (cm)  
 $D_p$  : 粒子径 (cm)  
 $g_c$  : 換算係数  
 $L$  : 層高 (cm)  
 $\Delta P$  : 圧力損失 (cmH<sub>2</sub>O)  
 $P_0$  : 大気圧 (g/cm<sup>2</sup>)  
 $P_1$  : 出口圧力  
 $P_2$  : 入口圧力  
 $T$  : 絶対温度 (°K)  
 $T_0$  : 273°K  
 $u$  : T°K におけるガス流速 (cm/sec)

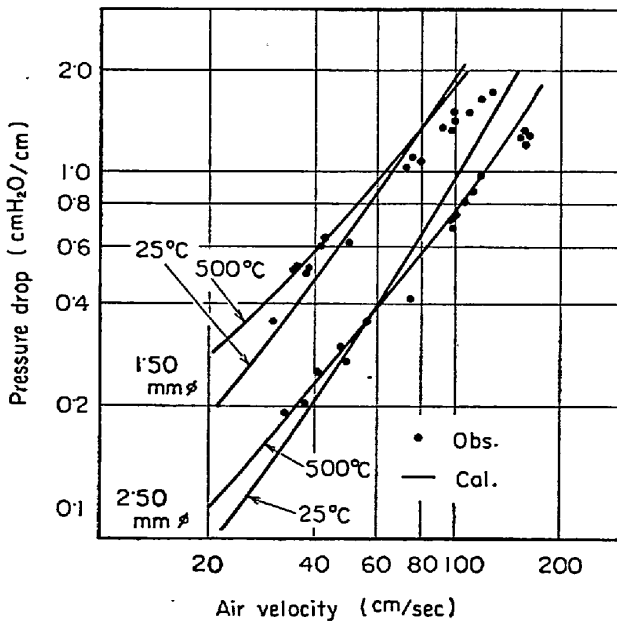


Fig. 8. Pressure drop of hot blast in moving bed.

$u_0$  : 標準状態におけるガス流速 (cm/sec)

$\gamma$  : 高密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$\kappa$  : 層内の水平圧と垂直圧との比

$\rho_f$  :  $T^\circ\text{K}$  におけるガス密度 (g/cm<sup>3</sup>)

$\mu_f$  :  $T^\circ\text{K}$  におけるガス粘性係数 (g/cm·sec)

$\mu_w$  : 層粒子と壁との摩擦係数

#### 文 献

1) S. ERGUN: Chem. Eng. Progr., 48 (1952), p. 89~94

2) M. LEVA: Fluidization, (1959), McGraw-Hill

3) B. BÖHLEN: Helvetica Chim. Acta, 139(1965),

p. 1270~1278

4) V.G. MAHCHINSKII and B.V. TROSHENKO: Trudy Leningradshovo Politeknicheskovo Instituta, 225 (1963), p. 149~155

5) J. HAPPEL: Ind. Eng. Chem., 41(1949), p. 1161~1174

6) 鈴木: 化学工学, 29(1965), p. 253~260

7) 矢木, 国井: 化学工学, 25(1960), p. 470

8) 井伊谷: 粉体工学ハンドブック, (1965), p. 108

9) J. W. DELAPLINE: A I Ch E J, 2(1956), p. 127~138

10) B. I. KITAEV: Tieploobmien v Domienni Pechi (1966) Metallurgizdat