

.....
 論 文

UDC 669.162.263.2 : 669.162.14-492

半径方向に粒度分布があるときの向流移動層の圧力損失*

天辰 正義**・吉沢 昭宣***・館 充****

Pressure Drop in Countercurrent Moving Bed with Radial Distribution of Particle Size

Masayoshi AMATATSU, Akinori YOSHIZAWA, and Mitsuru TATE

Synopsis:

Characteristics of pressure drop, gas velocity distribution and solids movement in countercurrent moving bed with radial distribution were studied.

Following results were obtained:

1. Radial mixing of particles in bed was not observed up to the channeling state. The effect of descending motion of particles on the pressure drop was not observed clearly. However, the pressure drop was found to be remarkably affected by the variation of radial distribution of void fraction.
2. Except for the upper layer, the pressure drop per unit bed height was found to be constant along the height of bed.
3. The pressure drop was found to vary considerably depending on the size combination of charged in center and periphery. It seemed that radial distribution of gas velocity was built up so as to realize uniform radial distribution of pressure and minimum pressure drop.
4. The gas velocity distribution was observed to correspond to radial distribution of particle size and to become more uniform with increasing rate of gas flow.

(Received Mar. 18, 1972)

1. 緒 言

実際の稼動中の高炉々内でガス濃度¹⁾、ガス温度²⁾および装入物粒度³⁾などは不均一分布になっていることが多くの実測によつて認められている。一方、高炉の急速操業化に伴つて不均一分布の最適な制御が重要な課題となつている⁴⁾。

充填された粒子に粒度分布がない向流移動層における圧力損失については前報⁵⁾に述べた。層内に流速および粒度分布がない条件のもとに誘導された Ergun の実験式が実測の圧力損失を最も十分に表現していることが確かめられた。

本研究では層内の半径方向に粒度分布がある向流移動層において圧力損失およびガス流速分布ならびにそれらに影響を及ぼすと考えられる粒子運動に関する測定を行なつた。その結果層内の粒度分布によつて圧力損失およびガス流速分布は変化することが確かめられたので、以下にそれらについて検討する。

2. 実 験

2.1 実験試料

充填粒子には、向流移動層の圧力損失の測定において焼結鉄（平均粒度=0.75, 1.5, 2.43, 3.22, 4.38 mm φ）を使用し、層内の粒子運動に関する実験には焼結鉄、ガラスビーズ（平均粒度=0.86, 1.71 φ）、マグネシヤ粒（平均粒度=1.5, 4.3 mm φ）および玉鉄（平均粒度=1.5 mm φ）を使用した。一方、流体には常温空気を用いたが送風量の範囲は 100~800 Nl/min であつた。

2.2 実験装置および方法

向流移動層での圧力損失の測定に使用した装置は装入装置を除いて前報⁵⁾の実験において使用したのと同じ

* 昭和44年10月本会講演大会にて発表
 昭和47年3月18日受付

** 東京大学工学部

*** 東京大学工学部 工博

**** 東京大学生産技術研究所 工博

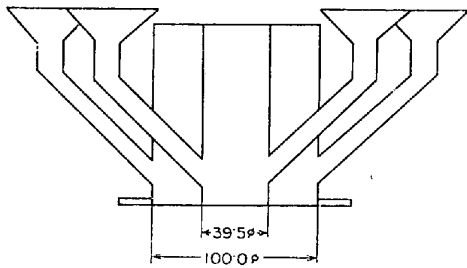


Fig. 1. Feed apparatus.

なので、ここでは装入装置について述べる。

装入装置は粒度の異なる粒子を装入したとき、層内で粒度分布が中心帯と周辺帯との2同心円になるように製作された特殊ホッパーである。その装入装置が Fig. 1 に示されている。内径 100 mm ϕ 鋼管に断面が同心円になるように、内径 39.5 mm ϕ 鋼管を溶接によつて取り付け付けた。内部の鋼管には2個のホッパーが、外部の鋼管には4個のホッパーがそれぞれ取り付けられた。

合計6個のホッパーを持つ装入装置から所定の粒子を装入し、層内の粒子が入れ替わった時点から送風を開始する。装入および送風が安定したとき、ストックレベルにおいて中心帯と周辺帯とは少々の鞍点が見られた。

圧力損失値の測定および粒子運動に関する測定は、一定送風量で層内の圧力が一定になつてから、それらの測定を行なつた。一方、粒子降下速度を 50 mm/min とした。

2.3 予備実験—向流移動層における粒子運動—

均一粒度の粒子を装入した向流移動層では、壁のごく近傍を除いてピストン流れであると考えてさしつかえないと結論されている⁵⁾⁶⁾。しかしながら、高炉の装入装置から装入された原料は不均一分布をしており傾斜をもつシャフト内での装入物の運動はピストン流れであるとは考えられない⁷⁾。炉内の粒子運動過程がガス流れに著しい影響を及ぼすと考えられるので、十分な解析を行なう必要がある⁴⁾。

層内粒子の流れに影響を及ぼす因子として、①粒度と管径の比、②粒子の形状、③粒子密度、④粒度、⑤内部摩擦係数、⑥降下速度、⑦空隙率、⑧充填管の形状、⑨装入方法および⑩送風量などが考えられるが、向流移動層における圧力損失に及ぼす粒子運動の影響を検討するとき、上述のすべての因子を考慮した実験を行なうことは困難である。したがつて圧力損失への重要な因子の影響だけを調査する観点から単純化した方法で粒子運動の問題点を把握することをさしあたりの実験課題とし、①半径方向充填粒子の重量比の測定および②写真による2帯の断面積比の測定を試み、粒子運動過程における粒子

混合による圧力損失への影響について検討する。

2.3.1 重量比測定からの粒子運動について

一定層高での2粒子の重量比を測定することによつて半径方向層内粒子の充填状態および運動の観察を行なつた。

粒度と密度がそれぞれ異なるガラスビーズ (0.86 mm ϕ) と焼結鉍 (2.43 mm ϕ) を前者が中心帯に後者が周辺帯に入るように装入し、周辺帯の粒子降下速度を 50 mm/min、空気送風量を 300Nl/min とし、層内の粒子が入れ替わった時点で粒子の排出ならびに送風を止める。つぎにガラス製の充填管の上部から約 10 cm ごとに粒子層を掃除器で吸上げ、それらの粒子を磁選機で選別し重量を測定する。

測定結果を Table 1 に示す。

Table 1 の結果から、周辺帯と中心帯との重要比は層高さ方向でほぼ一定値である。また粒子を吸上げるときの充填状態の観察から周辺帯と中心帯との境界において明白な粒子混合は見られなかつたが、重量比が一定であることは混合が存在して各帯の空隙率に変動があつたとも考えられる。したがつて、その境界の写真によつて、粒子移動過程での中心帯と周辺帯の有効面積を測定し、

Table 1. Results of measurement on weight of particles in countercurrent moving bed with radial distribution of particle size.

Depth of layer (cm)	Weight (g)		Weight ratio: A/B
	Sinter in periphery: A	Glass beads in center: B	
12.1~22.5	1 320	360	3.65
22.5~32.4	1 262	343	3.68
32.4~42.5	1 370	374	3.66
42.5~52.5	1 375	368	3.74
52.5~62.5	1 345	377	3.56
62.5~72.3	1 307	362	3.61
72.3~82.1	1 379	376	3.67
82.1~92.3	1 359	369	3.68

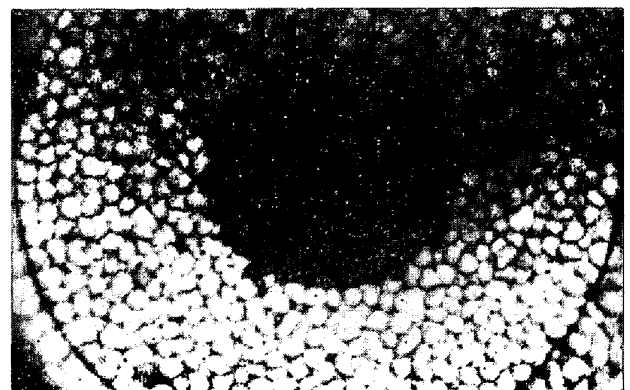


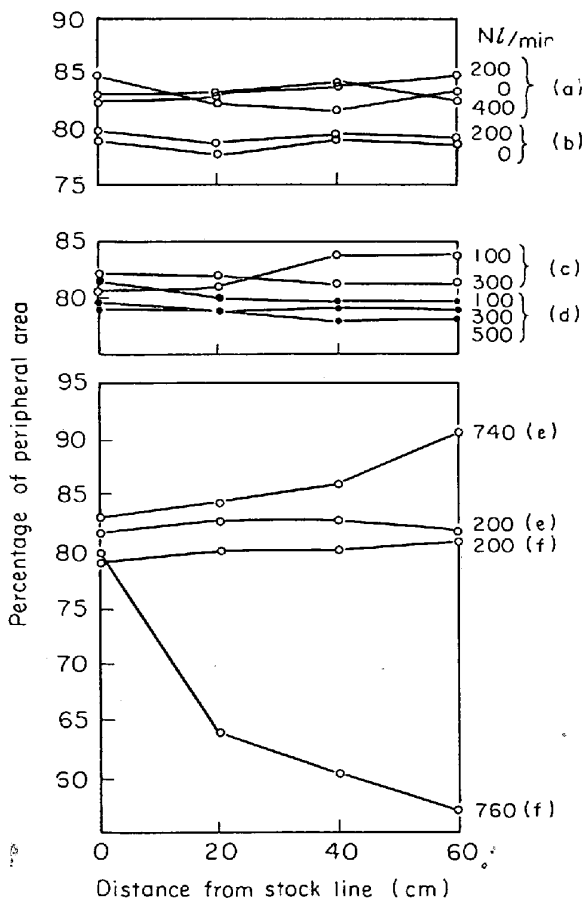
Photo. 1. Cross section of packed bed.

圧力損失を左右する因子について検討する。

2.3.2 写真による断面積の測定

中心帯と周辺帯が占める面積を写真から測定し、層半径方向の粒子運動に関する実験を行なった。装入粒子としてマグネシア粒子 (平均粒度 = 1.5, 3.4 mm φ) および玉銑 (1.5 mm φ) を使用した。送風量は 2~3 段階をとり、層が流動しない範囲とした。層の高さ方向に約 20 cm ごとに粒子を吸上げ層の上部から断面写真を撮った。Photo. 1 にその一例を示す。

粒子の装入は①粒度の異なる 2 種粒子, ②粒度が等しく密度が異なる 2 種粒子, ③粒度と密度とがともに異なる 2 種粒子という組み合わせで行なわれた。このような装入条件で得られた結果を縦軸に周辺帯が占める面積率, 横軸にストックラインからの距離をとり Fig. 2 に



Symbol	Center	Periphery
a	MgO 3.4 φ	MgO 1.5 φ
b	MgO 1.5 φ	MgO 3.4 φ
c	C.B. 1.5 φ	MgO 1.5 φ
d	MgO 1.5 φ	C.B. 1.5 φ
e	MgO 3.4 φ	C.B. 1.5 φ
f	C.B. 1.5 φ	MgO 3.4 φ

MgO : magnesia particle ; C.B. : cast iron beads

Fig. 2 Area of peripheral zone along the height of bed.

示す。

①の装入の場合、面積比率は高さ方向でわずかな変動が見られるがほぼ一定値を示している。②および③の装入の場合、装入の組み合わせ、降下距離および送風量によつて面積比率が変化する。すなわち②の装入の場合粒径が等しいから流速分布の変動は少なくかつ上向きのガス圧力が等しいと考えられるが、粒子密度が異なるため半径方向に荷重分布を生じると考えられる。したがつて粒子密度の小さいマグネシア粒子層は玉銑の層より疎な (空隙率が大きい) 充填になるとと思われる。この傾向は送風量の増大によつて著しくなる。

以上の結果では、装入粒子の組み合わせによつて粒子移動過程は変化する。しかし後述する圧力損失の測定結果では、その測定における装入粒子の組み合わせにおいて粒子混合は観察されなかつた。これらの結果は圧力損失の測定結果とあわせて後に検討する。

3. 実験結果および考察

3.1 充填層高さ方向の圧力損失分布

前報⁵⁾において、ホッパーから均一粒度の粒子を装入した充填層において測定された高さ方向の圧力損失値の中で層上部の圧力損失値とそれ以外の下部層における値とを比較すると、層上部の値が小さいことが確かめられた。そこで層内の半径方向に粒度分布がある場合の高さ方向の圧力損失分布を調べた。その結果を Fig. 3 および Fig. 4 に示す。Fig. 3 は中心帯に 1.5 mm φ, 周辺帯に 2.43 mm φ の焼結鉄を装入したとき、Fig. 4 は中心帯に 3.22 mm φ, 周辺層に 2.43 mm φ の焼結鉄を

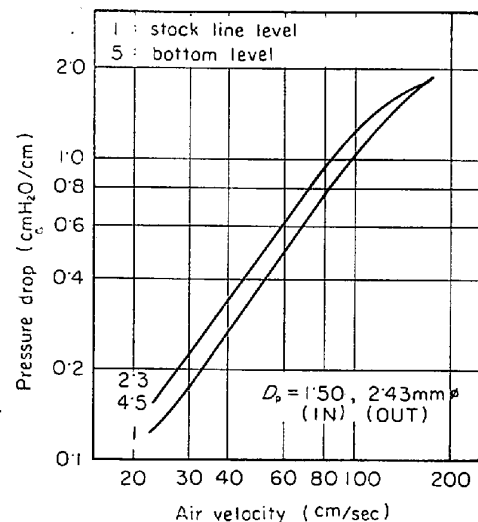


Fig. 3. Pressure drop along the height of countercurrent moving bed with radial distribution of particle size.

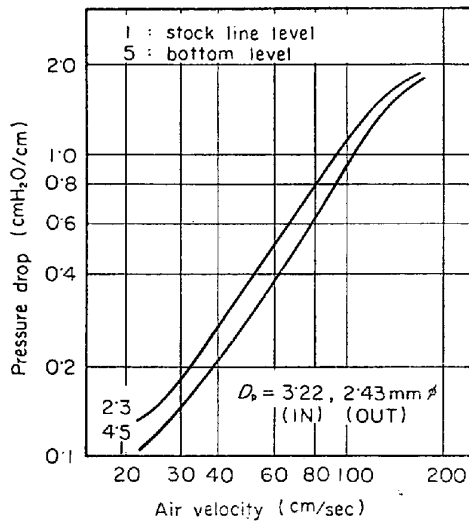


Fig. 4. Pressure drop along the height of countercurrent moving bed with radial distribution of particle size.

装入したときに得られた結果を示す。図中の数字は充填層の位置を示す。1は層の最上部層を、5が層の最下部を示す。縦軸に単位層当たりの圧力損失 (cmH₂O/cm) を、横軸に空塔速度 (cm/sec) をとり両対数目盛で示してある。以下の圧力損失曲線は Fig. 3, 4 と同じに示してある。

Fig. 3 および Fig. 4 から層上部の圧力損失のみが、粒度分布によらずそれ以外の層の値に比べて小さいことが確かめられる。したがって前報⁵⁾で述べたように、層上部は疎な充填状態であると考えられる。一方流速が増すに伴って圧力損失値が各層とも一致する傾向を示す。これは層内において粒子の混合が生じるためとも考えられる。以上の結果から、Fig. 5~12 に示した圧力損失

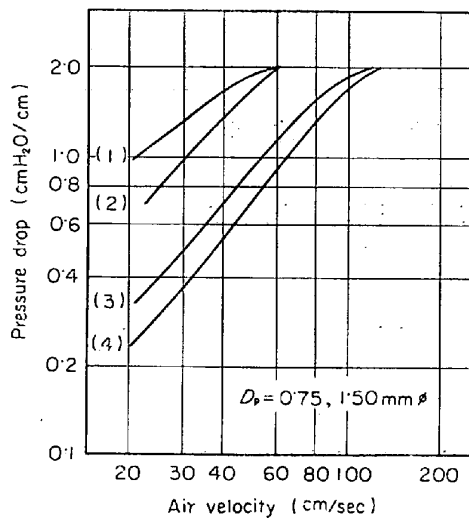


Fig. 5. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

を第 2~4 層 (層高 40 cm) において測定された値としている。

3.2 半径方向に粒度分布があるときの圧力損失曲線

粒度 0.75, 1.5, 2.43, 3.22, および 4.38 mm φ の焼結鉄について測定した向流移動層における圧力損失の結果が Fig. 5~12 に示されている。図中の曲線左端の (1), (2), (3) および (4) はそれぞれつぎの場合に対応する。

- (1) 小粒子単味装入
- (2) 周辺帯に小粒子を、中心帯に大粒子を装入
- (3) 周辺帯に大粒子を、中心帯に小粒子を装入
- (4) 大粒子単味装入

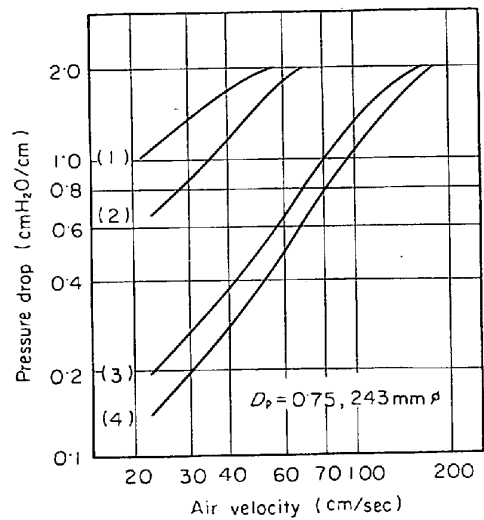


Fig. 6. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

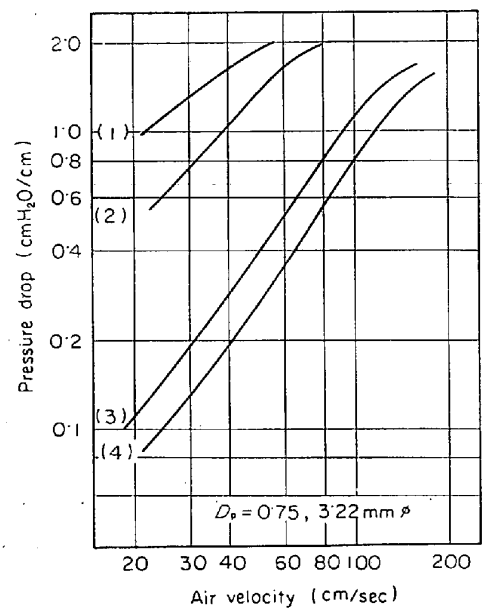


Fig. 7. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

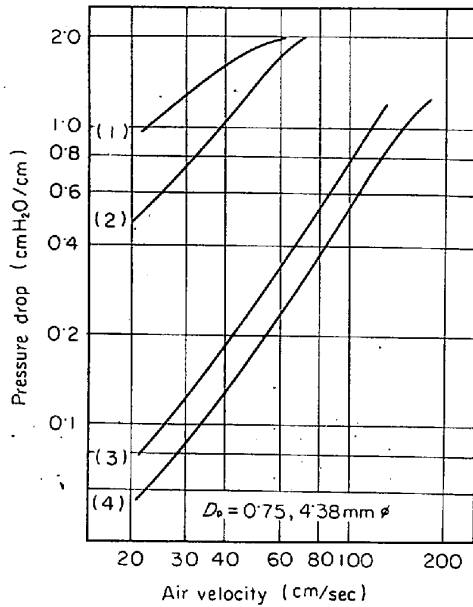


Fig. 8. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

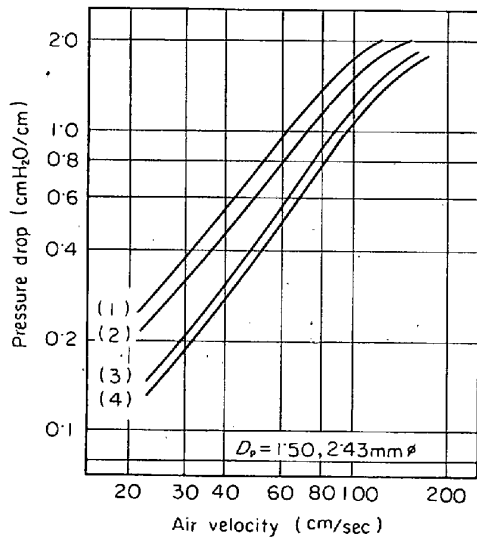


Fig. 9. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

Fig. 5~12 から圧力損失曲線は半径方向の粒度分布に著しく依存していることが明確に理解される。すなわち半径方向の粒度分布によつて同一流速における圧力損失値および圧力損失曲線の勾配が変化する。また粒度分布の組み合わせによつて流動開始最小速度すなわち圧力損失値が飽和値に達する流速が曲線(1)→(2)→(3)→(4)の順に大きくなり、また小粒子から大粒子へと大きくなる。このことは層内の流動状態の観察と圧力損失のデータとが一致していることから確かめられた。

曲線(1)の小粒子がすでに流動状態に達した流速範囲において他の曲線はまだ流動状態ではないことがわか

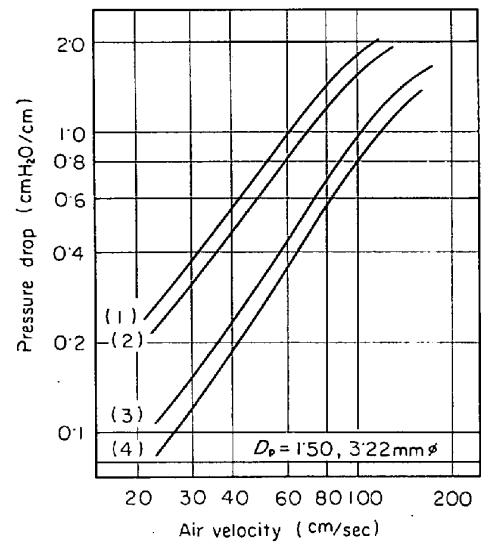


Fig. 10. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

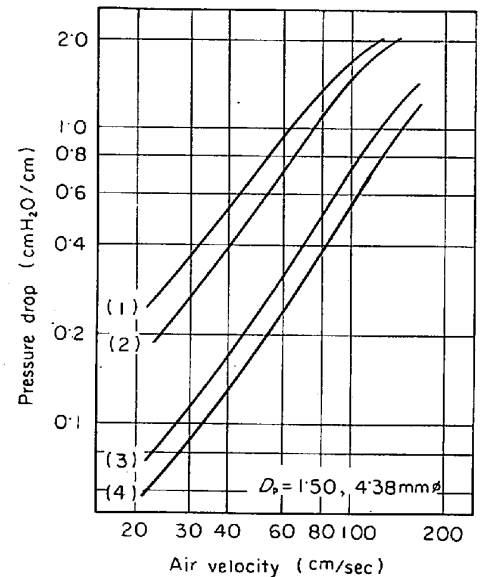


Fig. 11. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

る。このことは通気抵抗の小さい大粒子の方より多量のガスが流れていると考えられる。すなわち、ある層高においてガス圧力が最小に、かつガス圧力分布が半径方向で均一になるようなガス流速分布になるものと考えられる。はたして以上のように考えることが正しいかをガス流速分布の測定およびそのモデル計算とから検討してみる。

3.3 半径方向のガス流速分布

充填層内で半径方向のガス流速分布が測定されることが最も望ましい。しかしながら、それには測定上の困難さがある。したがって流速分布を調べる観点から、ストックレベルに設置したサーミスタ風速計(測定可能範囲

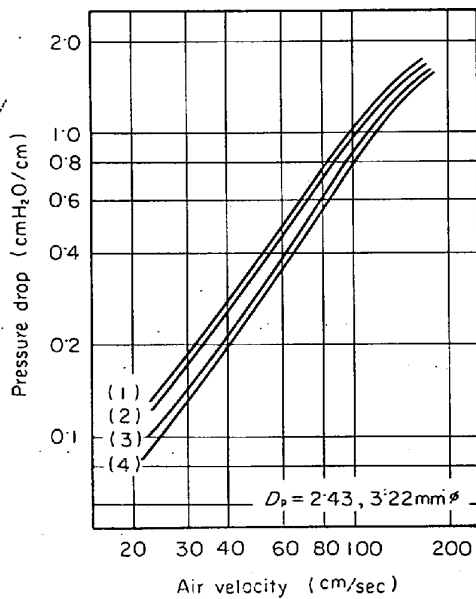


Fig. 12. Pressure drop in countercurrent moving bed with radial distribution.

Table 2. Radial gas distribution (observed).

Gas volume Nl/min	Gas velocity (cm/sec)			Gas velocity ratio u_1/u_2
	Superficial	Center: u_1	Periphery: u_2	
100	22.8	113	49	2.31
160	36.4	154	64	2.41
200	45.5	174	78	2.23
260	59.2	211	96	2.20
300	68.3	235	126	1.87
360	82.0	263	136	1.93
400	91.1	285	156	1.72

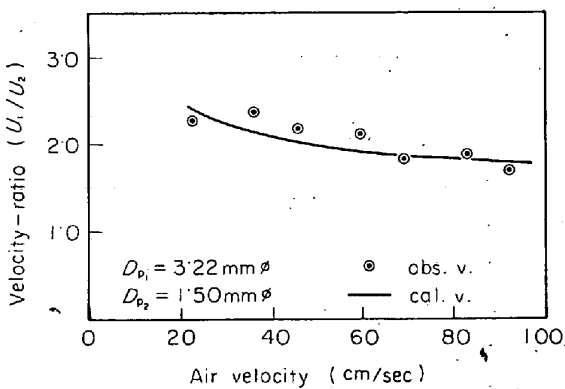


Fig. 13. Gas velocity distribution in bed.

: 0~300 cm/sec) によつてガス流速を測定した。

粒度 1.5 mm φ 焼結鉍を周辺帯に、3.22 mm φ 焼結鉍を中心帯に装入し、層高を約 80 cm とした。固定層のストックレベルにサーミスタ風速計の検出端をできるだけ接近させてガス流速の測定を行なつた。検出端をガス流れと平行に周辺帯および中心帯のそれぞれ中心部に設

置した。Table 2 および Fig. 13 に示すような結果が得られた。

Fig. 13 には縦軸に中心帯の流速 (u_1) と周辺帯の流速 (u_2) との比を、横軸に空塔速度 (cm/sec) をとり、実測値 (○印) ならびに以下に述べるガス流速の計算結果 (実線) が示されている。

ガス流速の計算ではつぎの仮定のもとに各帯の流速を算出する。

(1) ある高さにおける半径方向のガス圧力は均一分布である。

(2) 中心帯において粒度分布およびガス流速分布はない (ピストン流れ)。

(3) 周辺帯において粒度分布およびガス流速分布はない (ピストン流れ)。

(4) 粒度分布およびガス流速分布がないとき、層内のガス圧力損失式として ERGUN の実験式が適用される。上の仮定より (1) および (2) 式が得られる。

$$u_1 S_1 + u_2 S_2 = u(S_1 + S_2) \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{150\mu_f u_1}{D_{p1}^2} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} + \frac{1.75\rho_f u_1^2}{D_{p1}} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} = \frac{150\mu_f u_2}{D_{p2}^2} \cdot \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} + \frac{1.75\rho_f u_2^2}{D_{p2}} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \dots\dots (2)$$

添字 1 および 2 はそれぞれ中心帯および周辺帯を示す。

式 (1) および (2) を u_1 および u_2 について解き、その結果を Table 3 および Fig. 13 に示す。

実測によつて得られたガス流速 (Table 2) はガスの実流速、すなわち層内の空隙中を通過するガス流速である。これに空隙率を掛けて得られる値が空塔速度すなわち Table 3 のガス流速に対応する。しかしながら層内の空隙率分布が均一でなく、それが流速および粒度分布などに依存していることから^{8)~9)}、ガスの実流速には空隙率分布に伴う誤差を含んでいる。ガス流速の測定は中心帯および周辺帯において一定の方法で行なわれているので、ガス流速比は層内の流速分布特性を表わすから、これを計算と対比できる。

Fig. 13 の流速比とガス量との関係において、実測値

Table 3. Radial gas distribution (calculated).

Gas volume Nl/min	Gas velocity (cm/sec)			Gas velocity ratio u_1/u_2
	Superficial	Center: u_1	Periphery: u_2	
100	22.8	45.3	18.6	2.44
150	34.2	63.3	28.8	2.20
200	45.5	80.8	39.1	2.07
250	56.9	97.8	49.4	1.98
300	68.3	114.6	59.8	1.92
350	79.7	131.2	70.2	1.87
400	91.1	147.8	80.6	1.83

と計算値とは同様の傾向を示している。すなわち、ガス量の増大に伴ってガス流速分布はより均一になり、ガス圧力は均一かつ最小になるようにガスは流れる。

さらにガス流速分布は粒度分布に依存すると考えられる。この粒度分布によるガス流速分布を上述の仮定にもとづいて計算する。計算に用いるデータは実験条件と同値である。装入条件として中心帯に大粒子が、周辺帯に小粒子が装入されるとし、送風条件として 20°C 空気が流動開始最小速度まで送風されるとする。式(1)、(2)および装入粒度の組合せとによつて、ガス流速分布と流量との関係が Fig. 14 のように得られる。

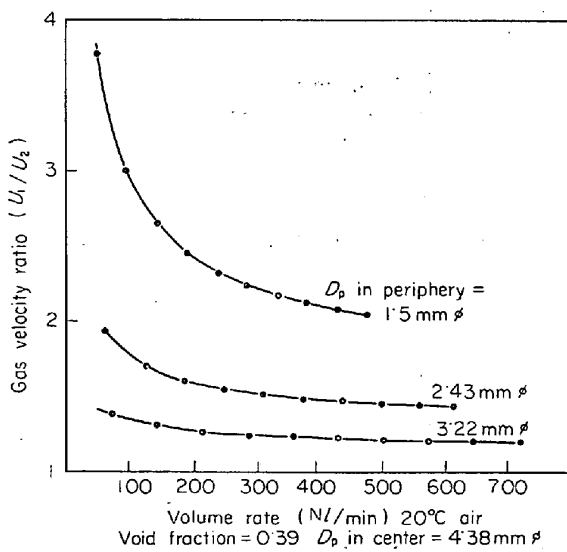


Fig. 14. Gas velocity distribution in bed.

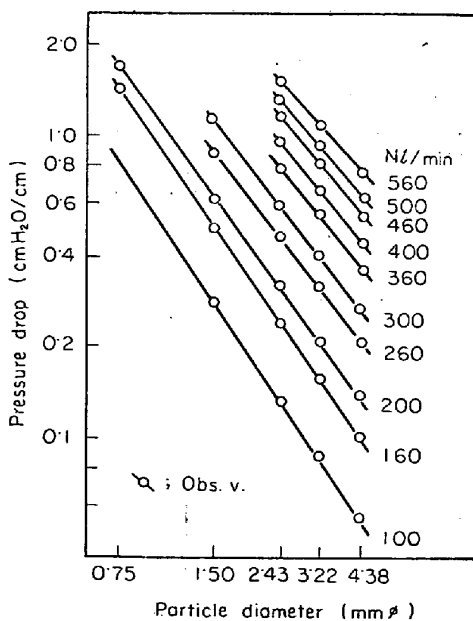


Fig. 15. Effect of particle size on pressure drop in moving bed with uniform size.

Fig. 14 から、ガス流速分布は粒度分布に著しく依存しており、流量が少ない範囲とくに粒度比が大きいときに、流量のわずかな変化によつて大きく変動することがわかる。また流速分布の限界値すなわち流動開始最小速度は装入される粒度分布によつて規定される。流速比 u_1/u_2 を近似的に C/V^n で表わすと、本実験条件では $C=4\sim 7$, $n=0.15\sim 0.23$ であつた。Cは粒子が占める断面積比およびnは粒度比にとくに依存している。

3.4 層内における平均粒子径および空隙率の評価

これまで圧力損失およびガス流速分布に及ぼすガス流量および粒度分布の効果について述べてきた。予備実験の項(2.3)で述べたように装入された粒子が占める断面積比は装入粒子の組合せによつて変化する。装入粒子の組合せの圧力損失への影響を層内粒子の移動過程の観察および圧力損失の測定結果とから検討する。

装入された粒子が均一粒度の場合について縦軸に単位層高当たりの圧力損失 Δp (cmH₂O/cm) を、横軸に粒子径 D_p (mm ϕ) をそれぞれ両対数目盛でとり流量 (NI/min) をパラメータとして図示すると Fig. 15 が得られる。ここでは各流量において圧力損失と粒度とは直線関係にある。

充填された粒子が占めるホッパー出口の面積を考慮して層内における平均粒子径を①相加平均、②相乗平均および③調和平均で表わすと、

$$\text{相加平均} = \frac{S_1 D_{p1} + S_2 D_{p2}}{S_1 + S_2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{相乗平均} = S_1 + S_2 \sqrt{D_{p1} S_1 \cdot D_{p2} S_2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{調和平均} = \frac{S_1 + S_2}{\frac{S_1}{D_{p1}} + \frac{S_2}{D_{p2}}} \dots\dots\dots (5)$$

となる。

(3)、(4)および(5)式から粒度 1.5 mm ϕ および 3.22 mm ϕ の組合せおよび 1.5 mm ϕ と 4.38 mm ϕ の組合せについて相加、相乗および調和の各平均粒子径を算出しそれぞれの値を横軸にとり、縦軸には圧力損失値をとつて、ガス流量をパラメータとして均一粒度の粒子を装入したときの圧力損失値と層内に粒度分布があるときのそれと一致する点(黒丸)が Fig. 16, 17 に示されている。

大きい粒子が周辺帯を占める場合(図中右側の大きい平均粒子径)では、平均粒子径の小さい値すなわち調和平均または相乗平均において圧力損失値が均一粒径の場合の内挿値と一致する。しかし周辺帯を小さい粒子が占める場合(図中左側の小さい平均粒子径)では平均粒子径の大きい値すなわち相加平均値において同様の一致が

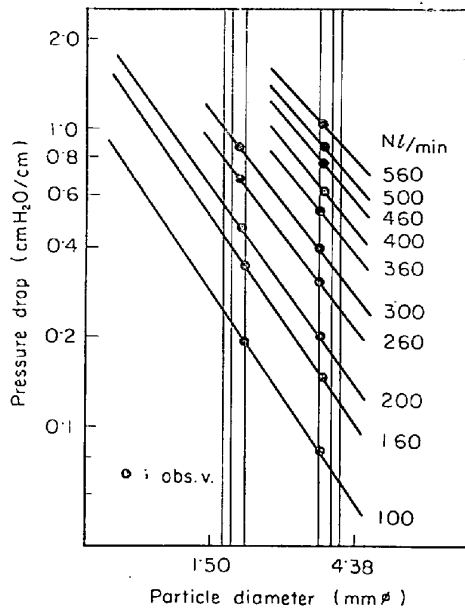


Fig. 16. Effect of particle size on pressure drop in moving bed with radial distribution.

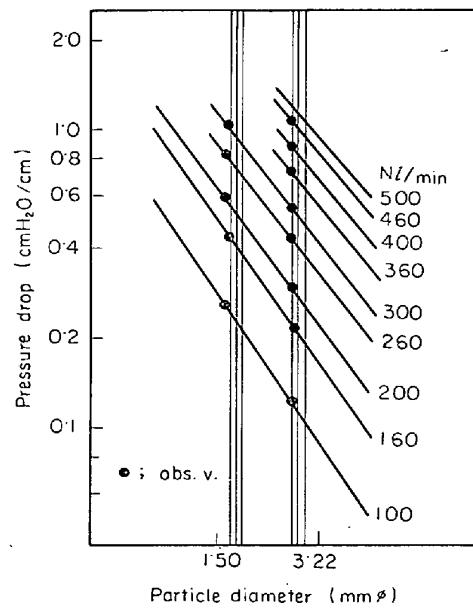


Fig. 18. Effect of particle size on pressure drop in moving bed with radial distribution.

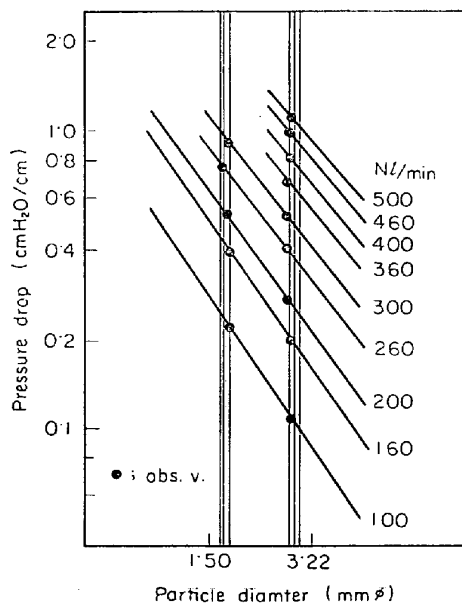


Fig. 17. Effect of particle size on pressure drop in moving bed with radial distribution.

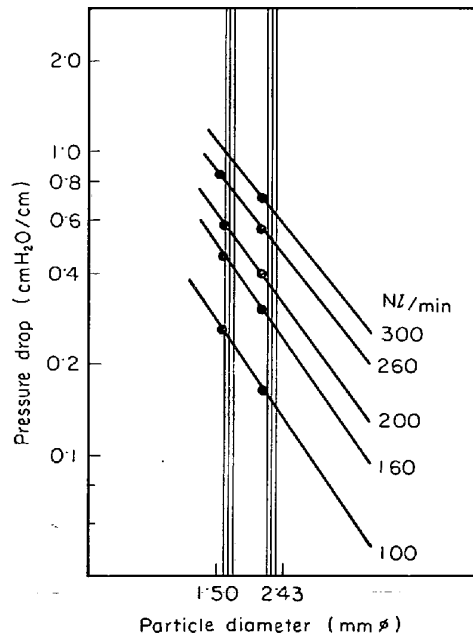


Fig. 19. Effect of mixed particle size on pressure drop in moving bed.

見られる。このことは粒子の移動過程において、とくに中心帯と周辺帯の境界において空隙率の変動が生じるためとも考えられる。それは次のような実験結果から明らかになる。

粒度 1.5 mm φ と 3.22 mm φ ならびに 1.5 mm φ と 2.43 mm φ の粒子をあらかじめ重量比を 1:4 の割合で混合し、充填層に装入して得られた圧力損失と粒度との関係を Fig. 18 および 19 に示す。大きい粒子が多量混合装入されても、小粒子が多量混合装入されても、調

和平均粒子径よりさらに小さい粒子径で均一粒度の粒子装入時の圧力損失と混合装入時のそれとが一致する。すなわち混合装入時の空隙率は明らかに小さくなることを示す。

したがって密度が等しく粒度が異なる 2 種粒子を中心帯と周辺帯との 2 帯に装入するとき、移動過程における圧力損失への影響は顕著ではない。しかし粒子の装入方法によつては粒子混合が生じるため圧力損失に顕著な影響を及ぼすことがある。

4. 結 言

向流移動層の半径方向に粒度分布があるときの圧力損失の測定において次の結果が得られた。

1. 吹抜現象が生じない流速範囲において層内の粒子混合は観察されなかつた。したがって半径方向に粒度分布がある層において圧力損失に及ぼす粒子移動過程の効果は十分には観察されなかつたが、混合粒子層では空隙率の変化が圧力損失に著しく影響することがわかつた。

2. 最上層部を除いて、層高さ方向の圧力損失分布はなかつた。

3. 中心帯および周辺帯に装入された粒度の組合せによつて、圧力損失曲線は著しく変化することがわかつた。これからガスは層内のガス圧力が均一にかつ最小になるように流れると思われる。

4. ガス流速分布は層内の粒度分布に対応しており、

ガス流量の増大に伴つて一層均一分布になることが確かめられた。

文 献

- 1) 桑野, 中根, 館: 学振 54 委 1133 (1969)
- 2) G. HEYNERT: Stahl u. Eisen, 80 (1960), p.854~861
- 3) S. P. KINNEY: Tech. Paper No 442, Bureau of Mines, (1929)
- 4) 館: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1402~1414
- 5) 天辰, 全, 吉沢, 館: 鉄と鋼, 57(1971), p.1461~1467
- 6) 矢木, 国井: 化学工学, 25 (1961), p. 470~476
- 7) GOTLIB(館 訳): 高炉製鉄法の理論 [鉄鋼協会] p. 3
- 8) R. JESCHAR: Arch. Eisenhüttenw., 35 (1964), p. 91~108
- 9) K. POLTHIER: Arch. Eisenhüttenw., 37 (1966), p. 365~374