

# 高炉シャフト部におけるガスの通気性に関する モデル実験\*

菊池 淳\*\*・名雪 利夫\*\*\*・浅川 純\*\*\*\*  
前田 四郎\*\*・不破 祐\*\*・萬谷 志郎\*\*

## Model Experiment on the Permeability of Gas in the Shaft of a Blast Furnace

Atsushi KIKUCHI, Toshio NAYUKI, Kiyoshi ASAKAWA,  
Siro MAEDA, Tasuku FUWA, and Shiro BAN-YA

### Synopsis:

The pressure drops caused by the flow of gas through the various packed beds were measured in order to obtain some information on the permeability of gas in the shaft of a blast furnace. The packed beds used in this study are (a) A-type bed or a bed packed with single sized materials (glass beads, alumina pellets, Marcona pellets, or coke), (b) B-type bed or a bed packed layer by layer with different sized materials, and (c) C-type bed or a bed composed of binary mixtures of materials with different size distributions. The results obtained are as follows: (1) The pressure drops for A-type bed were correlated by the equation,  $\Delta p g_c D_p^2 \varepsilon^3 / L \mu U (1-\varepsilon)^2 = 6.8 \phi_c X^{0.8}$ , where  $X = Re / (1-\varepsilon)$ ,  $Re = D_p U \rho / \mu$ ,  $D_p$  = diameter of materials,  $L$  = length of the bed,  $U$  = superficial velocity of gas,  $g_c$  = conversion factor,  $\rho$  = density of gas,  $\mu$  = viscosity of gas,  $\varepsilon$  = fractional voidage, and  $\Delta p$  = pressure drop. (2) The value of  $\phi_c$  was unity in the range  $300 < X < 8000$  for spherical glass beads with smooth surface, which consisted with the value obtained by HICKS under the similar conditions, while the value for another materials was greater than unity. From this, it was satisfactory to consider the coefficient  $\phi_c$  as the parameter due to the degree of surface roughness and the degree of distortion. (3) The pressure drops for both B-type and C-type beds could be estimated by means of the above equation, in which  $D_p$  and  $\phi_c$  were calculated by the equations  $W/D_p = \sum_{i=1}^n W_i/D_{p,i}$ , and  $W/\phi_c = \sum_{i=1}^n W_i/\phi_{c,i}$ , respectively, where  $W$  = weight of packing materials and  $i$  = number of layers or component of mixtures.

### 1. 緒 言

我が国では高炉に整粒鉱や焼結鉱の補助的な装入物としてペレットを加えているが、ペレットのみを主な鉄源として装入する操業は試験程度しかおこなわれていない。しかし現状のペレットの装入法やコークスの大きさが最も適当であるか否かについては不明である。

ペレットに対するコークスの適性サイズや適性な装入法は高炉シャフト部内のガスの流動特性、伝熱特性などの観点から検討されるべきと考える。それゆえにシャフト部内のガスの流動機構を解明することは非常に重要である。

シャフト部は鉱石層とコークス層とが交互に堆積され

ている充填層とみなしうが、その充填層内における充填物の粒径は半径方向、円周方向および高さ方向で異なると考えるのが一般的である。

従来、充填層を通る気流の圧力損失に関する実験的研究は均一径の粒子が充填された場合について多くなされ<sup>1)</sup>、層内の高さ方向、円周方向および半径方向に粒径分布がある場合についてはあまりなされておらず、最近高炉シャフト部内のガスの流動機構に関する一考察として、半径方向に粒径分布がある場合の圧力損失を天辰ら<sup>2)</sup>、森山<sup>3)</sup>らが実験的に考察しているにすぎない。

また均一径の粒子が充填されている場合の気流の圧力損失は通常 ERGUN<sup>4)</sup>の式で求められている。この式は充填物の種類には無関係に成立するものとみなされてい

\* 昭和 48 年 10 月 本会講演大会にて発表 昭和 51 年 7 月 29 日 受付 (Received July 29, 1976)

\*\* 東北大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Tohoku University, Aramaki-Aoba Sendai 980)

\*\*\* 東北大学大学院 (現 日本鋼管(株)技術研究所) (Graduate School, Tohoku University)

\*\*\*\* 東北大学工学部 (現 ブリジストンタイヤ(株)) (Faculty of Engineering, Tohoku University)

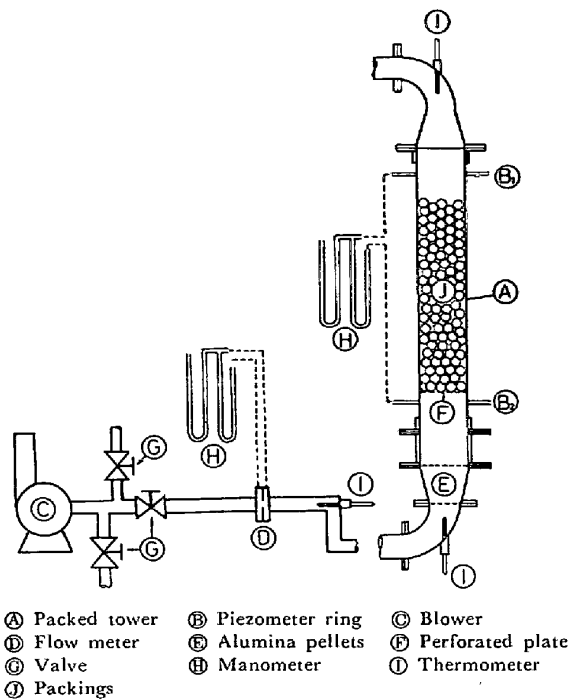


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

る。しかし、充填物の種類によつて ERGUN の式が適合しない場合がある<sup>4)</sup>。また高流量のガスの圧力損失が ERGUN の式に適合しないという研究もあり<sup>5)6)</sup>、ERGUN の式の適用についてまだ疑問が残されている<sup>7)</sup>。

本研究はシャフト部内のガスの流動機構に関する基礎的な知見を得るために、まず(i)粒径が均一と考えられる充填層を通る気流の圧力損失を求め、その結果を ERGUN の式と比較検討した。ついで粒径の異なる粒子または異種粒子を、(ii)高さ方向に交互に充填した場合および(iii)混合して充填した場合の気流の圧力損失を実験的に検討した。

## 2. 実 験

### 2.1 実験装置および実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示した。充填塔<sup>A</sup>は内径 150 mm、高さ 1 180 mm のステンレス鋼管で、その下部<sup>E</sup>には 2 種のアルミナペレット (13.5 mmφ, 5.8 mmφ) が充填されている。多孔板<sup>F</sup>としてはステンレス製の目皿板を用い、また送風機<sup>C</sup>および流量計<sup>D</sup>にはそれぞれルーツプロアおよびオリフィス流量計を用いた。圧力損失測定用のピエゾメータ環  $B_1$ ,  $B_2$  の距離は 800 mm である。

まず、充填物の重量を測定し、それを塔に充填し層高を測定する。つぎに、送風機より塔に空気を送入し、ガス流量、圧力損失  $4p$  および塔入口、出口における気流

の温度  $t_1$ ,  $t_2$  を測定した。計算に必要なガスの物性値は  $t_1$  と  $t_2$  の算術平均値における値を用いた。なお、実験後も層高を測定し、それが送風前と同じであることを確かめた。

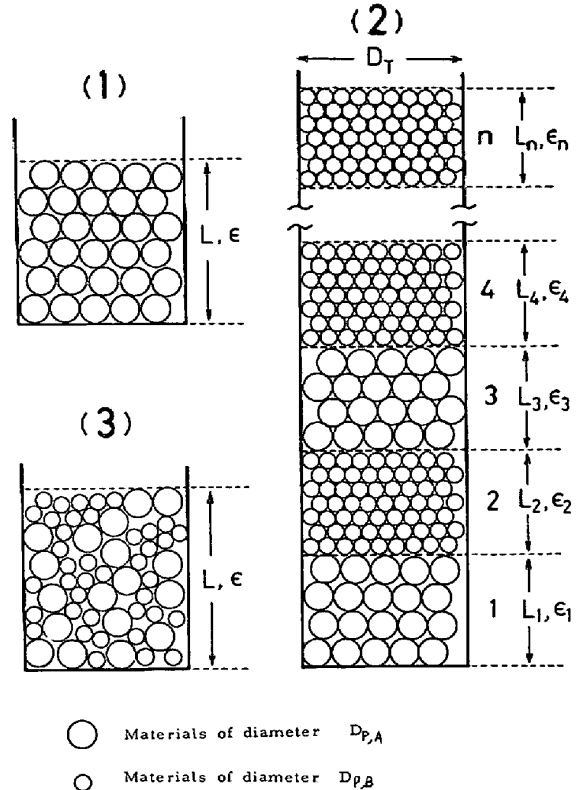


Fig. 2. Packed beds used in this study.

- (1) A-type bed or a bed packed with single sized materials.
- (2) B-type bed or a bed packed layer by layer with different sized materials.
- (3) C-type bed or a bed composed of binary mixtures of materials with different size distributions.

Table 1. Properties of packing materials used in this study.

Material	Average diameter $D_p \times 10^3(\text{m})$	Range of diameter $D_p \times 10^3(\text{m})$	Density $\rho_p \times 10^{-3} (\text{kg/m}^3)$	Remarks
Glass beads	5.5	4.5~6.5	2.43	Spheres, smooth surface
	12.5	12.2~12.8	2.50	
	16.7	16.3~16.9	2.50	
	24.5	24.2~24.8	2.49	
	29.4	29.2~29.6	2.49	
Alumina pellets	5.8	5.5~6.0	3.27	Spheres, rough surface
	13.5	13.0~14.0	3.36	
Marcona pellets	13.7	13.2~14.3	4.29	Rough surface
	14.5	14.0~14.9	4.29	
Coke	24.6	20.0~30.0	1.11	Rough surface
	34.6	30.0~40.0	1.11	

また充填層内の空間率  $\epsilon$  は次式により求めた。

$$\epsilon = 1 - (4W/\pi D_T^2 L \rho_p) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $W$ は充填物の重量、 $L$ は層高、 $D_T$  および  $\rho_p$  はそれぞれ塔径および充填物の密度である。

2.2 充填物および充填形式

充填物としてはガラス粒子、アルミナペレット、マルコナペレットおよびコークスを用いた。充填物1個の大きさとしては、ほぼ球形とみられるガラス粒子およびアルミナペレットの場合には一方向径をとり、球形よりわずかに偏倚しているマルコナペレットおよび球形より著しく偏倚しているコークスの場合には長径と短径の幾何平均径をとつた。いずれの充填物も整粒したのものを用いた。また充填物の群の平均径としては約100個の径の算術平均値を用いた。

Table 2. Experimental conditions for A-type bed.

Run No.	Material	$D_p \times 10^3$ (m)	$\epsilon$ (-)	$L$ (m)
1001	G	5.5	0.38	0.167
1002	G	12.5	0.39	0.076~0.375
1003	G	16.7	0.39	0.076~0.442
1004	G	24.5	0.41	0.078~0.289
1005	G	29.4	0.41	0.078~0.475
1101	A	5.8	0.43	0.197~0.300
1102	A	13.5	0.42	0.115~0.429
1201	M	13.7	0.51	0.181
1202	M	14.5	0.51	0.117
1301	C	24.6	0.49	0.509
1302	C	34.6	0.53	0.409

G : Glass beads  
 A : Alumina pellets  
 M : Marcona pellets  
 C : Coke

Table 3. Experimental conditions for B-type bed of glass beads.

Run No.	$n$	$D_{p, 2i-1} \times 10^3$ (m)	$D_{p, 2i} \times 10^3$ (m)	$W_{2i-1}$ (kg)	$W_{2i-1}/W_{2i}$	$L$ (m)	$\epsilon$ (-)
2001	2	12.5	16.7	1.5	1	0.114	0.40
2002	4	12.5	16.7	1.5	1	0.224	0.40
2003	6	12.5	16.7	1.5	1	0.340	0.40
2004	8	12.5	16.7	1.5	1	0.445	0.39
2005	12	12.5	16.7	1.5	1	0.667	0.39
2006	4	12.5	24.5	2.0	1	0.301	0.40
2007	4	12.5	24.5	1.0	1/4	0.381	0.40
2008	4	12.5	24.5	4.0	4	0.370	0.38

Run No.	$n$	$D_{p, 1} \times 10^3$ (m)	$D_{p, 2} \times 10^3$ (m)	$D_{p, 3} \times 10^3$ (m)	$W_1$ (kg)	$W_1/W_2$	$W_1/W_3$	$L$ (m)	$\epsilon$ (-)
2009	3	12.5	16.7	24.5	2.0	1	1	0.232	0.41
2010	3	12.5	16.7	24.5	2.0	1	1/2	0.304	0.40
2011	3	12.5	16.7	24.5	2.0	1/2	1	0.303	0.40
2012	3	12.5	16.7	24.5	4.0	2	2	0.303	0.40
2013	3	12.5	16.7	24.5	2.0	1/2	1/2	0.378	0.40
2014	3	12.5	16.7	24.5	4.0	2	1	0.385	0.40
2015	3	12.5	16.7	24.5	4.0	1	2	0.375	0.40

Table 4. Experimental conditions for B-type bed of glass beads and another materials.

Run No.	$n$	$i$	Material	$D_{p, i} \times 10^3$ (m)	$\epsilon_i$ (-)	$L_i$ (m)	$W_i$ (kg)
2101	2	1	G	12.5	0.40	0.150	4.0
		2	A	13.5	0.43	0.118	4.0
2102	2	1	G	12.5	0.39	0.074	2.0
		2	A	13.5	0.43	0.236	8.0
2103	2	1	G	12.5	0.40	0.302	8.0
		2	A	13.5	0.42	0.058	2.0
2201	2	1	M	13.7	0.49	0.104	4.0
		2	G	16.7	0.37	0.144	4.0
2202	2	1	M	14.5	0.50	0.105	4.0
		2	G	12.5	0.38	0.147	4.0

G : Glass beads, A : Alumina pellets, M : Marcona pellets

Table 5. Experimental conditions for C-type bed.

Run No.	Material	$D_p \times 10^3$ (m)	W (kg)	$\epsilon$ (-)	L (m)
3001	G	12.5	5.0	0.38	0.367
	G	24.5	5.0		
3002	G	12.5	2.0	0.39	0.372
	G	24.5	8.0		
3003	G	12.5	8.0	0.40	0.376
	G	24.5	2.0		
3101	G	12.5	4.0	0.42	0.270
	A	13.5	4.0		
3102	G	12.5	2.0	0.42	0.311
	A	13.5	8.0		
3103	G	12.5	8.0	0.40	0.359
	A	13.5	2.0		

G : Glass beads, A : Alumina pellets

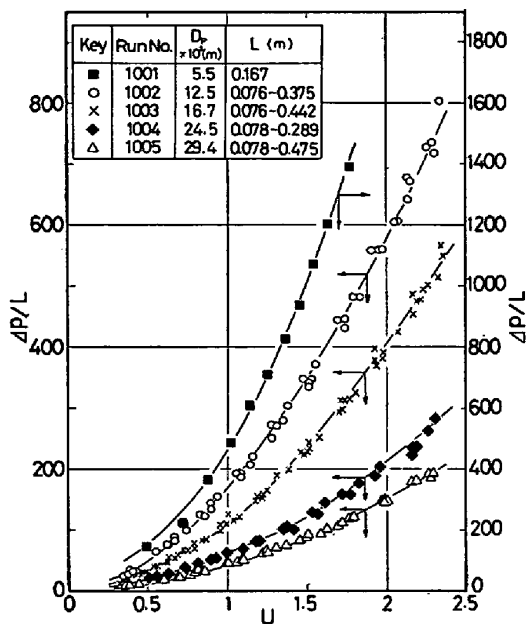


Fig. 3. Relation between  $\Delta p/L$  and  $U$  for A-type bed of glass beads.

使用充填物の平均径, 粒径範囲, 密度および表面性状を Table 1 に示した. なお, 密度  $\rho_p$  は水置換法により求めた値である.

つぎに, 本実験で用いた充填層を Fig. 2 に示した. これら三つの充填層を便宜上(1) A型充填層(2) B型充填層および(3) C型充填層と定義した. それぞれの場合の実験条件を Table 2~5 に示した.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 A 型充填層の場合

(1)  $\Delta p/L$  と  $U$  との関係 Fig. 3, 4 に  $\Delta p/L$  と空

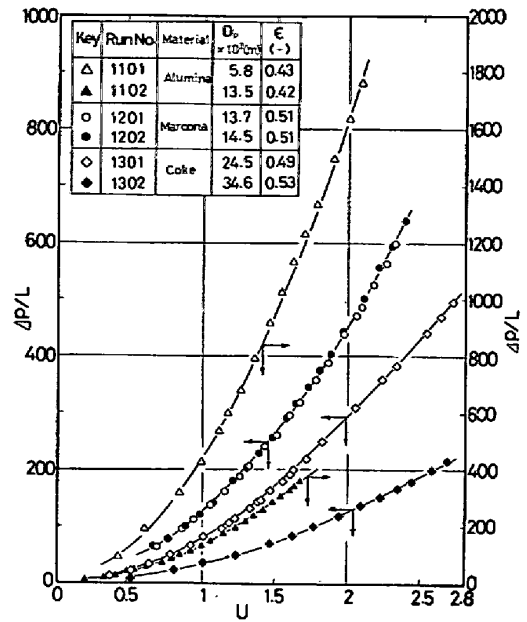


Fig. 4. Relation between  $\Delta p/L$  and  $U$  for A-type bed of various materials.

塔速度  $U$  との関係を示した. いずれの充填物の場合も  $\Delta p/L$  は  $U$  の増加とともに放物線的に増加している. またガラス粒子およびアルミナペレットの場合, 本実験範囲内では  $\Delta p/L$  は層高  $L$  に無関係となっている. これはガス流動に対して端効果が無視され, また層内のガスの流動状態が高さ方向で変わらなかつたためと考えられる. また Fig. 3, 4 より, 当然であるが粒径  $D_p$  が小さくなるにつれて  $\Delta p/L$  は大きくなっている. マルコナペレットの場合  $\Delta p/L$  が  $D_p$  で変化していないのは用いたペレットの  $D_p$  の差が小さかつたためと考えられる.

(2) 既往の研究 充填層を通る気流の圧力損失に関する実験式はこれまでかなり多く提出されているが<sup>1)</sup>, そのなかで ERGUN の式が高炉シャフト部内のガスの圧力損失の計算によく用いられている<sup>8)</sup>.

ERGUN<sup>9)</sup> は充填層を通る気流の圧力損失すなわち全流動抵抗は粘性抵抗と慣性抵抗との和であらわされるとして, (2)式を提出している.

$$Y = 150 + 1.75X \dots \dots \dots (2)$$

ここに

$$Y = \Delta p g_c D_p^3 \epsilon^3 / \{L \mu U (1 - \epsilon)^2\}, X = Re / (1 - \epsilon),$$

$$Re = D_p U \rho / \mu$$

(2)式には形状係数が含まれていないので, (2)式は実験範囲における平均の形状について成立するものとみなされる<sup>1)</sup>.

また, (2)式は  $X \leq 2500$  で求められたものであるが,  $X$  が約 1000 以上では  $X$  が大きくなるとともに  $Y$  の実測

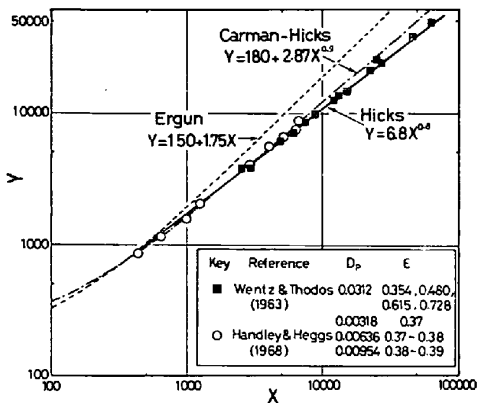


Fig. 5. Pressure drop correlations for packed beds of spheres.

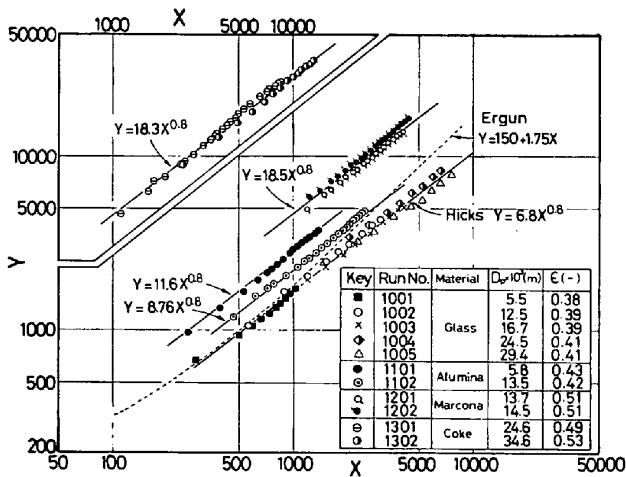


Fig. 6. Pressure drop correlations for A-type bed.

値が(2)式より小さくなるのが最近指摘されている。

すなわち Hicks<sup>7)</sup>は充填物の表面がなめらかで、かつその形状が球の場合の  $\Delta p$  の文献値<sup>5)6)</sup>より、 $X=300\sim 60000$  の場合に適用できる式として次式を提出している。

$$Y = \alpha_c X^{0.8} \quad (\alpha_c = 6.8) \dots\dots\dots (3)$$

いま、Fig. 5に(2)、(3)式およびつぎの CARMAN-HICKSの式を比較した<sup>7)</sup>。

$$Y = 180 + 2.87 X^{0.9} \dots\dots\dots (4)*$$

図より、(3)式によるYの計算値は  $X=300\sim 5000$  および  $X=300\sim 2000$  の範囲でそれぞれ CARMAN-HICKSの式および ERGUNの式による計算値とほぼ一致している。

(3) 本実験式 本実験結果をYとXとの関係で示すと Fig. 6 のようになる。

まず、球形で表面がなめらかなガラス粒子の場合についてみると、実験範囲 ( $X=300\sim 8000, D_T/D_p=5.1$

$\sim 27.2$ ) ではYは  $D_T/D_p$  には無関係でXのみで定まっている傾向がみとめられる。この結果は本実験とほぼ同じ条件 ( $X=100\sim 6000, D_T/D_p=8\sim 22$ ) 下でおこなった HANDLEY ら<sup>6)</sup>の結果と一致している。したがって本実験範囲内では圧力損失に対して塔径の影響がないものと考えられる。なお層流下 ( $X<10$ ) では圧力損失におよぼす塔径の影響が  $D_T/D_p=7\sim 50$  で認められている<sup>10)</sup>。

また Fig. 6 より  $X<1000$  ではYは ERGUNの式とほぼ一致しているが、 $X>1000$  ではXが大きくなるとともにYは ERGUNの式より小さくなっている。本実験結果は WENTZ ら<sup>5)</sup>、HANDLEY ら<sup>6)</sup>らの結果と同様 HICKSの式でほぼあらわされている。したがって  $X>300$  ではYは HICKSの式で算出するのが妥当と考えられる。

つぎに球形のアルミナペレットの場合についてYとXとの関係を見てみると、Yはガラス粒子の場合と同様  $X^{0.8}$  に比例している。しかしYはガラス粒子のそれよりも大きく、しかもYとXとの関係は  $D_p$  によつて異なっている。これらの相違の原因は用いたアルミナペレットの表面があらく、しかもその表面あらかさの程度が  $D_p$  によつて異なっていたためと考えられる。

圧力損失に粒子の表面粗さが影響することは LEVA ら<sup>11)</sup>が実験的に示しているが、しかし現状ではその影響を定量的に表現することは困難である。

つぎに形が球から偏倚しているマルコナペレットおよびコークスの場合もYは  $X^{0.8}$  に比例しているが、これらの場合にはYは  $D_p$  には無関係であった。

以上、本実験結果を次式であらわすことができた。

$$Y = \alpha_c \phi_c X^{0.8} \quad (\alpha_c = 6.8) \dots\dots\dots (5)$$

$\phi_c$  の値を一括して Table 6 に示したが、 $\phi_c$  は粒子の表面粗さおよび球形からの偏倚の程度で異なるものと考えられる。

### 3.2 B型充填層の場合

(1) 圧力損失の加成性 B型充填層の場合の  $\Delta p/L$  とUとの関係の1例を Fig. 7 に示した。ガラス粒子の

Table 6. Empirical correlations.

Material	$D_p \times 10^3$ (m)	Empirical correlation	$\phi_c$ in Eq. (5) (-)
Glass	5.5~29.4	$Y = 6.8 X^{0.8}$	1.00
Alumina	13.5	$Y = 8.76 X^{0.8}$	1.29
	5.8	$Y = 11.6 X^{0.8}$	1.71
Marcona pellet	13.7, 14.5	$Y = 18.5 X^{0.8}$	2.72
Coke	24.6, 34.6	$Y = 18.3 X^{0.8}$	2.69

\* CARMANは層流域と乱流域とに分けて  $\Delta p$  の実験式を提出した<sup>1)</sup>。  
(4)式は HICKSが球形粒子の場合についてこれらの式を加えて提案したものである。

場合は充填物の総重量, 粒径比 ( $D_{p, 2i-1}/D_{p, 2i}$ ) が一定の条件下で得られたデータである. この場合は  $\Delta p/L$  は単位層の数  $n$  には無関係で  $U$  のみで定まっている. したがってこの場合には圧力損失についてつぎの加成性になりたつていると考えられる.

$$\Delta p/L = \sum_{i=1}^n \Delta p_i/L \dots \dots \dots (6)$$

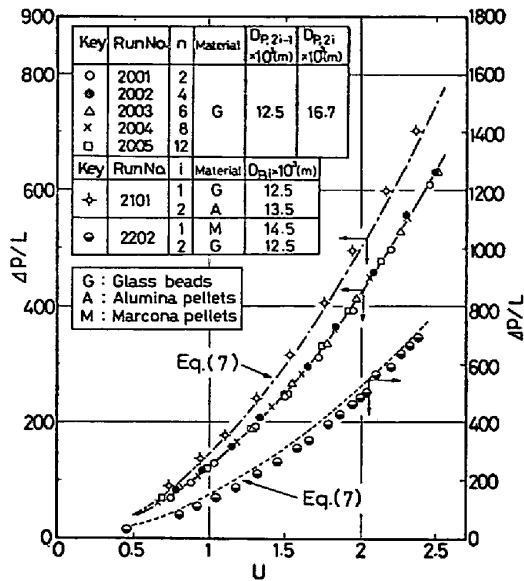


Fig. 7. Relation between  $\Delta p/L$  and  $U$  for B-type bed.

なお, ガラス粒子の場合, Table 3 に示すごとく各層の空間率  $\epsilon_i$  および層高  $L_i$  は求めなかつた. これは表面がなめらかな球形粒子の場合には,  $\epsilon_i \approx \epsilon$  でまた  $L_i$  は後述の(9)式より算出されると考えたからである.

いま,  $i$  層の圧力損失が(5)式であらわされるとすれば, (6)式は次式であらわされる.

$$\Delta p/L = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{L_i \mu U (1 - \epsilon_i)^2}{g_c D_{p,i}^3 \epsilon_i^3} \right\} \phi_{c,i} \alpha_c \left\{ \frac{D_{p,i} \rho U}{\mu (1 - \epsilon_i)} \right\}^{0.8} \dots \dots \dots (7)$$

Fig. 7 に異種の充填物からなる2層の場合の  $\Delta p/L$  と  $U$  の関係を示した. 図より,  $\Delta p/L$  の実測値は(7)式による計算値とほぼ一致しており, したがってこれらの場合も圧力損失について加成性になりたつていると考えられる.

(2) 層平均の  $D_p$  および  $\phi_c$  つぎのようにして層平均の  $D_p$  および  $\phi_c$  を算出してみた.

まず, 層全体の圧力損失が(5)式の形であらわされると仮定する. ただし, (5)式中の  $D_p, \epsilon, \rho_p$  および  $\phi_c$  は層平均の値とする.  $\rho_p$  および各層の空間率  $\epsilon_i$  はそれぞれ(8)および(9)式で与えられる.

$$W/\rho_p = \sum_{i=1}^n W_i/\rho_{p,i} \dots \dots \dots (8)$$

Table 7. Calculated diameter  $D_p$  and coefficient  $\phi_c$ .

Run No.	$i$	Material	$D_{p,i}$ $\times 10^3$ (m)	$\phi_{c,i}$ (-)	$\phi_c$ , (-) Eq. (11)	$D_p \times 10^3$ (m) Eq. (10)	$D_p \times 10^3$ (m) Eq. (12)	$D_p \times 10^3$ (m) Eq. (13)
2001	1	G	12.5	1.0	1.0	—	14.3	14.3
	2	G	16.7	1.0				
2101	1	G	12.5	1.0	1.13	13.0	—	13.0
	2	A	13.5	1.29				
2102	1	G	12.5	1.0	1.22	13.2	—	13.3
	2	A	13.5	1.29				
2103	1	G	12.5	1.0	1.05	12.7	—	12.7
	2	A	13.5	1.29				
2201	1	M	13.7	2.72	1.46	14.5	—	15.0
	2	G	16.7	1.0				
2202	1	M	14.5	2.72	1.46	12.7	—	13.4
	2	G	12.5	1.0				
2006	1	G	12.5	1.0	1.0	—	16.4	16.6
	2		24.5	1.0				
	3		12.5	1.0				
	4		24.5	1.0				
2009	1	G	12.5	1.0	1.0	—	16.5	16.6
	2		16.7	1.0				
	3		24.5	1.0				

$1 - \varepsilon_i = 4W_i / (\pi D_T^2 L_i \rho_{p,i}) \dots \dots \dots (9)$   
 (1), (5), (7) および (9) 式より (10) 式が得られる.

$$\frac{\phi_c W (1 - \varepsilon)}{D_p^2 \rho_p \varepsilon^3} \left( \frac{D_p}{1 - \varepsilon} \right)^{0.8} = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_{c,i} W_i (1 - \varepsilon_i)}{D_{p,i}^2 \rho_{p,i} \varepsilon_i^3} \left( \frac{D_{p,i}}{1 - \varepsilon_i} \right)^{0.8} \dots \dots \dots (10)$$

つぎに  $\phi_c$  について次式を仮定すると,

$$W / \phi_c = \sum_{i=1}^n W_i / \phi_{c,i} \dots \dots \dots (11)$$

(10), (11) 式より  $\phi_c, D_p$  が算出される\*.

とくに ガラス粒子 の 場合には  $\phi_{c,i} = \phi_c = 1, \varepsilon_i = \varepsilon, \rho_{p,i} = \rho_p$  とみなされるので,  $D_p$  は (10) 式から得られる次式で算出される.

$$W (1 / D_p)^{1.2} = \sum_{i=1}^n (W_i / D_{p,i})^{1.2} \dots \dots \dots (12)$$

以上の諸式を用いて,  $\phi_c, D_p$  を算出した結果を Table 7 に示した. また  $D_p$  が次式の調和平均径で近似されるならば, 便利と考えられたのでその値も Table 7 に示した.

$$W / D_p = \sum_{i=1}^n W_i / D_{p,i} \dots \dots \dots (13)$$

表より, マルコナペレットを含む2層の場合を除くと, (13)式で  $D_p$  はよく近似されている.

いま, (11)式と(13)式より求めた  $\phi_c$  および  $D_p$  を用いて,  $Y/\phi_c$  および  $X$  を算出した結果を Fig. 8, 9 に示した.

いずれの場合も  $Y/\phi_c$  はガラス粒子の場合のA型充填層の結果とほぼ一致している. また, マルコナペレットを含む2層の場合, (10)式より得た  $D_p$  を用いて  $Y/\phi_c$

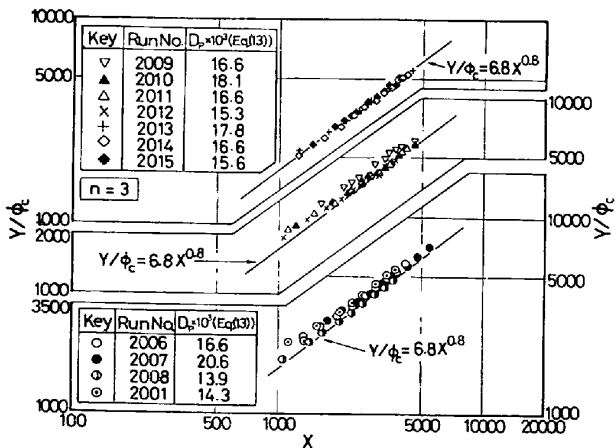


Fig. 8. Relation between  $Y/\phi_c$  and  $X$  for B-type bed of glass beads.

\*  $\phi_c$  の式として,  $W\phi_c = \sum_{i=1}^n W_i\phi_{c,i}, \phi_c = (\phi_{c,1}\phi_{c,2}\dots\phi_{c,n})^{1/n}, \phi_c = (1/n)\sum_{i=1}^n \phi_{c,i}$  などの式も仮定してみた. しかし, これらの式と (10)式より  $D_p$  を求めると,  $D_p < D_{p,i}$  or  $D_p > D_{p,i}$  となる場合があった.

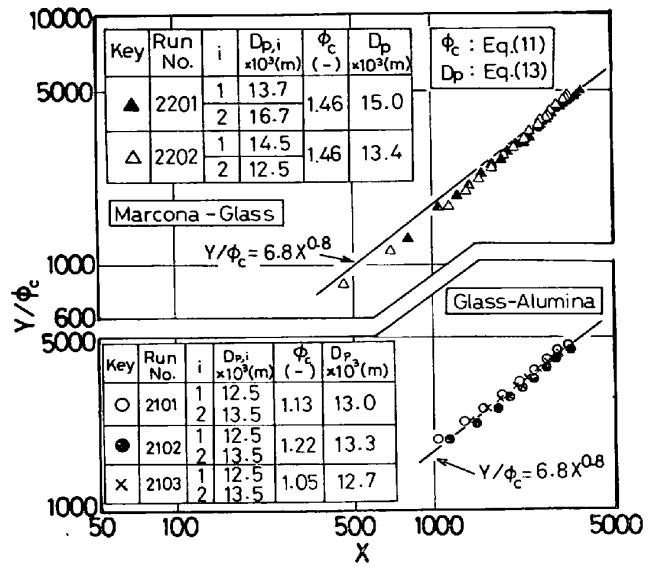


Fig. 9. Relation between  $Y/\phi_c$  and  $X$  for B-type bed of various materials.

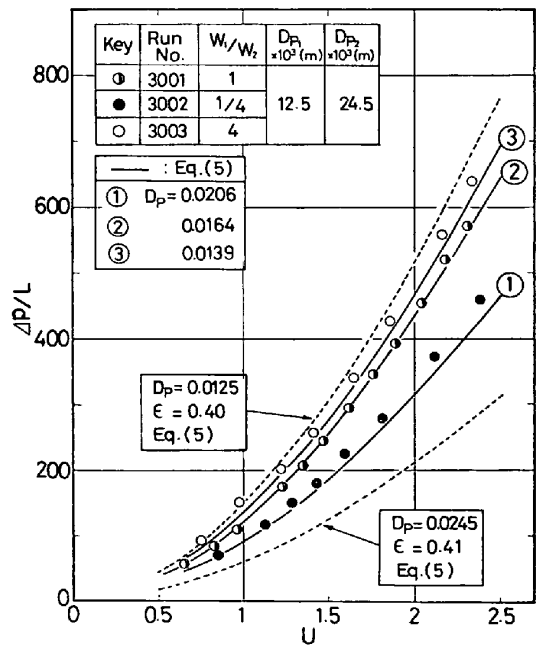


Fig. 10. Relation between  $\Delta p/L$  and  $U$  for C-type bed of glass beads.

と  $X$  を算出した結果, Fig. 9 とほぼ同じ関係を得た.

以上, (11) および (13) 式でそれぞれ層平均の  $\phi_c$  および  $D_p$  が算出され, また B 型充填層の圧力損失は (5) 式で推算することができると考えられる. しかし, 隣接層における  $\phi_c, D_p$  および  $\varepsilon$  などの差異が Table 4 におけるそれらの差異よりも著しい場合, 本報のような取り扱いが可能か否かは不明である.

### 3.3 C 型充填層の場合

まず,  $\Delta p/L$  と  $U$  との関係を Fig. 10 に示した. いずれの場合も  $U$  の増加とともに  $\Delta p/L$  は放物線的に大きく

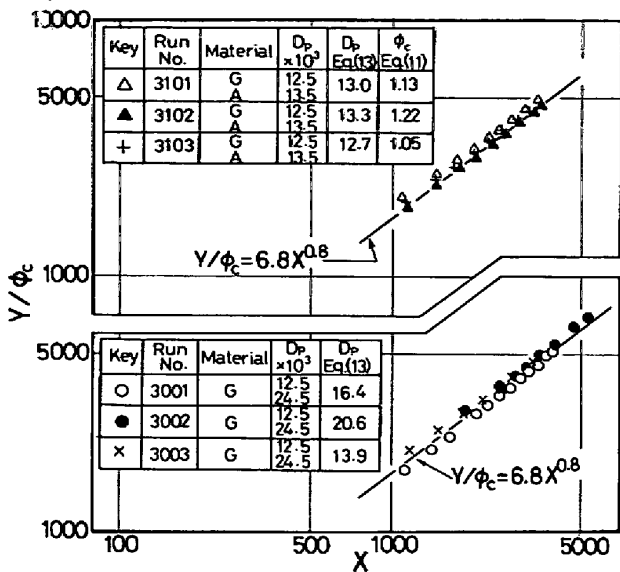


Fig. 11. Relation between  $Y/\phi_c$  and  $X$  for C-type bed.

なっている。この関係はA型充填層の場合 (Fig. 3, 4) およびB型充填層の場合 (Fig. 7) と同様である。

つぎに、C型充填層の場合の層平均の  $D_p$  および  $\phi_c$  を算出してみる。

通常、充填物の粒径分布のひろがり著しい場合、充填物の代表径としては(13)式の調和平均径が用いられている<sup>1)12)</sup>。

そこで、C型充填層の場合の層平均の  $D_p$  を(13)式より、また  $\phi_c$  を(11)式より算出し、 $Y/\phi_c$  と  $X$  との関係を探してみた。その結果を Fig. 11 に示した。 $Y/\phi_c$  と  $X$  との関係はガラス粒子のA型充填層の結果と一致している。また  $\Delta p/L$  の実測値と(5)式による  $\Delta p/L$  の計算値とは Fig. 10 に示すごとくほぼ一致している。したがってC型充填層の場合も(11)式および(13)式でそれぞれ層平均の  $\phi_c$  および  $D_p$  が算出され、また(5)式で圧力損失を推算することができると思われる。

#### 4. 結 論

A型充填層、B型充填層およびC型充填層を通る気流の圧力損失を実験的に検討した結果、実験範囲内からつぎの結論を得た。

(1) A型充填層を通る気流の圧力損失は(5)式であらわされた。とくに球形で表面がなめらかなガラス粒子のA型充填層の場合(5)式は Hicks の式と一致した。また(5)式における  $\phi_c$  は充填物の表面粗さの程度および球形からの偏倚の程度で異なる係数と考えられた。

(2) B型充填層を通る気流の圧力損失は各層の圧力

損失の和であらわされた。また(11)式で定義した  $\phi_c$  および(13)式で定義した  $D_p$  を用いれば、B型充填層およびC型充填層の圧力損失はいずれも(5)式で推算された。

本研究の実験装置資材ステンレス鋼管は住友金属(株)に、各種のコークスとその整粒については新日鉄(株)釜石製鉄所に御便宜をはかっていただいた。関係各位に謝意をあらわす。また実験装置の製作と実験に協力していただいた恩田啓卓氏(現日鉄建材(株))、橋林三氏(現川崎製鉄(株))に謝意をあらわす。

#### 記 号

- $D_p$  = 充填物の平均径 [m]
- $D_T$  = 塔径 [m]
- $g_c$  = 重力換算係数 [kg·m/kg·sec<sup>2</sup>]
- $L$  = 充填層総高 [m]
- $L_i$  =  $i$  層の充填層高 [m]
- $n$  = 単位層の数 [-]
- $Re$  = レイノルズ数 ( $=D_p U \rho / \mu$ ) [-]
- $\Delta p$  = 圧力損失 [mm H<sub>2</sub>O]
- $U$  = ガスの空塔速度 [m/sec]
- $W$  = 粒子の充填量 [kg]
- $X = (Re / (1 - \epsilon))$  [-]
- $Y = (\Delta p g_c D_p^3 \epsilon^3 / L \mu U (1 - \epsilon)^2)$  [-]
- $\alpha_c$  = 定数 (=6.8) [-]
- $\epsilon$  = 空閑率 [-]
- $\rho$  = ガスの密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho_p$  = 粒子の密度 [kg/m<sup>3</sup>]
- $\mu$  = ガスの粘度 [kg/m·sec]
- $\phi_c$  = (5)式の係数 [-]
- 添字  $i$  = 底部からの層の番号

#### 文 献

- 1) 白井 隆: 流動層, (1961), [科学技術社]
- 2) 天辰正義, 吉沢昭宣, 館 充: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 46
- 3) 森山 昭, 西尾賢一: 鉄と鋼, 60 (1974), p.1271
- 4) 岡部俠児, 田口整司, 宮崎伸吉: 学振54委, No. 1315, 高炉化工小委資料 (1974)
- 5) C. A. WENTZ and G. THODOS: A I Ch E J, 9 (1963), p. 81
- 6) D. HANDLEY and P. J. HEGGS: Trans. Instn. Chem. Engrs., 46 (1968), T 251
- 7) R. E. HICKS: Ind. Eng. Chem. Fund., 9(1970), p. 500
- 8) 桑原 守, 靱 巖: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 463
- 9) S. ERGUN: Chem. Eng. Progr., 48 (1952), p. 89
- 10) D. MEHTA and M. C. HAWLEY: Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop, 8 (1969), p. 280
- 11) M. LEVA and M. GRUMMER: Chem. Eng. Progr., 43 (1947), p. 633
- 12) S. ERGUN: Ind. Eng. Chem., 45 (1953), p. 477