攪拌を伴う移動量の圧力損失

Pressure Drop of a Moving Bed with Mechanical Agitation

佐藤 宗武*
Munetake SATO

北田 康夫*
Yasuo KITADA

矢野 武夫*
Takeo YANO

平田 豊*
Utaka HIRATA

宮南 啓*
Kei MIYANAMI

1. 緒言

粉粒体層に機械的攪拌を付加した移動層あるいは流動層型装置はスラッシングやチャネリングが抑制され、気泡の分散効果が良くなると共に粉粒体の混合も促進され、容積効率、気固接触効率の向上が計れる。そのためにホットスポットの防止ならびに凝集、固着物の解砕などにより粒子同士および壁間の熱、物質移動が良好になるなど多くの特徴を持っている。さらに、吹き込まれる気流によって粒子層の充てん状態が疎になることから、攪拌時の抵抗が軽減されることも知られている¹⁻³⁾。

このような装置内の粉粒体層に気流を吹き込む際の層内の圧力損失は、装置の構造、粒子の物性および各種の操作条件によって影響され、気流速度と圧力損失⁴⁾あるいは空隙率との関係など多くの既往の研究結果をそのまま適用するには種々の問題を生じる場合もある。とくに、流動化開始速度以下の低流速で、攪拌によって粉粒体層の混合を主に促進させる場合には、攪拌羽根形状の要素と回転速度などの操作条件の要素が圧力損失、換言すれば粒子の充てん状態に大きく影響する。

本報では、粉粒体の連続混合機としてすでにその良好な混合性能が確かめられている装置を用いて^{4,5)}、攪拌槽底部から空気を吹き込んだときの粉粒体層の圧力損失を種々の形状の攪拌羽根で攪拌しつつ、また、粉粒体を連続的に流下移動させた場合についてそれぞれ測定し、槽内部の粒子の流動と充てん状態を考察した。これらの実測値に基づいて、圧力損失を、粉粒体の物性、攪拌羽根形状および操作条件の項を含む実験式として表わし

た。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略は図1に示したような移動層塔部と攪拌羽根駆動部および空気吹込み部から成っている。攪拌槽は内径 D_T (0.12~0.30 m)、高さ H_T (0.5 m) のメタクリル樹脂製円筒①内に種々の寸法比の攪拌羽根②を取り付けたもので空気吹込みは槽底部から行なう形式である。槽底の空気分散部は 2 mm の穴を持った開孔比

1. cylinder	2. impeller	3. distributor plate
4. compressor	5. control valve	6. flow meter
7. orifice	8. tap	9. transducer
10. transducer	11. amplifier	12. amplifier
13. recorder	14. motor	15. hopper
16. discharger	17. distributor	

図1 実験装置の概略図

昭和56年2月24日受付

*大阪府立大学工学部化学工学科

(〒591) 大阪府堺市百舌鳥梅町4丁目804

TEL 0722-52-1161(内)2327

0.009の多孔板③に目開き 104 μm の網を重ね、その下に 6 mm のガラス球を充填した整流部から成っている。空気はコンプレッサー④から調整弁⑤を経て分散部に送られ、流量はロータリーメータ⑥およびオリフィス⑦で測定される。粉体層の圧力損失は槽底部と壁面に設けた圧力タップ⑧に差圧変換器⑨を取り付けて測定される。流速測定用差圧変換器⑩と圧力損失用のそれ⑨を用いることにより $\Delta p-u$ の関係が容易に測定可能である。

使用した槽の寸法、攪拌羽根の種類と代表寸法および粉粒体試料の種類と物性値を表 1、2 に示した。

実験は槽内に一定量の粉粒体を装入して圧力損失を測定する i) 回分操作法と、粉粒体を定量供給排出して流下移動させつつ測定する ii) 連続操作法の二種類を行なった。連続操作法の場合には粉粒体の層高を一定に保つために光電式粉体レベル計を用いて上部供給機を制御した。圧力損失 Δp は、空気流速 u 、粉粒体流量 F 、攪拌速度 N_s 、粉粒体層高 H を変化させて測定した。

3. 各種条件下における圧力損失の測定結果

円筒容器に理想的に設計された分散器を取付けた流動層に対する最小流動化速度 u_{mf} や圧力損失 Δp_{mf} などに

表 1 攪拌羽根の寸法

Outer Diameter (D_0):	0.058–0.24[m]
Pitch of Ribbon (P_0):	0.06–0.36[m]
Width of Blade (b_0):	0.004–0.027[m]
Ratio of Pitch (P_0/D_0):	0.51–2.03[—]
Ratio of Width (b_0/D_0):	0.047–0.153[—]
Ratio of Interval (h_s/D_0):	0–1.0

関しては古くからかなり多くの理論的あるいは実験的な報告があるが、本報で用いる装置のように粉粒体層内に羽根などの内部構造物が存在し、攪拌すると共に粉粒体を流下移動させるような場合には圧力損失と空気流速の関係は複雑となり、あらかじめ実験しておく必要がある。

図 2 には 4 種類の条件下での圧力損失変動曲線の例を示した。本装置では羽根を挿入しない場合には圧力損失は激しく変動しスラギングが生じていると推測された。羽根を挿入した場合にはわずかに変動幅が小さくなると共に圧力損失が増大している。これは羽根が空気の流れに対して障害物として作用しているだけでなく粉粒体の垂直方向への動きが制限されるためと考えられる。

図 2 種々の操作条件下における圧力損失特性

表 2 粉粒体の物性値

Material	$\bar{d}_p[\mu\text{m}]$	$\phi_c[-]$	$\rho_s[\text{kg/m}^3]$	$\epsilon[-]$	$u_{mf}[\text{m/sec}]^{*)}$
P.V.C.	260	0.66	1560	0.61	0.022
Toyoura sand	258	0.66	2690	0.43	0.038
Zircon sand	147	0.72	4660	0.37	0.051
Charcoal bead	330	1.0	1890	0.62	0.100
Glass bead	310	1.0	2530	0.40	0.118
Iron powder	371	0.59	7790	0.58	0.182
Iron granule	1330	0.65	7780	0.60	2.83
Polystyrene bead	750	1.0	1030	0.42	0.282
Silicon Carbide	1320	0.58	3810	0.42	1.12
Sesame	2190	0.26	1040	0.42	0.904
Rice	3980	0.44	1420	0.44	2.12
Sugar granule	3910	0.60	1560	0.40	4.56

*) calculate by eq. (3)

key	solid particles	u_{mf} [m/s]
○	zircon sand	0.051
●	toyoura sand	0.038
○	PVC	0.022
●	iron Powder	0.182
○	glass bead	0.118
●	SiC	1.12
○	iron granule	2.83
○	sesame	0.90
⊕	rice	2.12

図3 圧力損失比 Δp^* とガス流速比 u^* の関係

つぎに羽根を回転 ($N_s=1.5$ rps) させた場合には圧力損失は小さくなり、変動幅も減少し安定した通気状態となった。このことは羽根の回転により気泡が分散されしかも粉粒体層が均一充てん化された結果、層全体としての充てん状態が疎になるために圧力損失が減少したと考えられる。この状態でさらに粉粒体を流下させると圧力損失はわずかに減少する。この傾向もやはり充てん状態がわずかに疎になるためとみなせる。このようにここで用いたような装置では空気の流れと粉粒体層圧力損失との関係は操作条件、羽根形状、粉粒体物性などによって複雑に変化するので、以下ではこれらの因子について検討する。

3.1 圧力損失に及ぼす粉粒体物性の影響

粒径、密度、形状の異なる種々の粉粒体試料を用いて攪拌速度 $N_s=0.25$ [rps]、粉体層高 $H=0.2$ [m] の条件で得た空気流速 u [m/sec] と圧力損失 Δp [Kg/m²] の関係を図3に無次元の u^* と Δp^* を用いて示した。ここで u^* と Δp^* はそれぞれ

$$u^* = u / u_{mf} \quad \dots\dots(1)$$

$$\Delta p^* = \Delta p / \Delta p_{mf} \quad \dots\dots(2)$$

であり、 u_{mf} は流動化開始速度であり Δp_{mf} はその流速における圧力損失である。なお u_{mf} と Δp_{mf} は操作条件や羽根形状により変化するので、ここでは基準として単なる粉粒体層の最小流動化開始速度と圧力損失として良く知られている次式による計算値を用いた。

$$u_{mf} = \frac{g}{2K_c} \phi_c^2 d_p^2 \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2} \frac{\rho_s - \rho_f}{\mu_f} \quad \dots\dots(3)$$

$$\Delta p_{mf} = H \rho_a \frac{g}{g_c} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 ϵ は粉粒体層の空隙率 [-]、 ρ_s は粒子の密度 [kg/m³]、 d_p は粒径 [m]、 ρ_a は粒子の見かけ密度 [kg/m³]、 ϕ_c は形状係数 [-]、 μ_f は流体の粘度 [kg/m·sec] であり、 K_c は実験定数である。

図から明らかなように粉体の種類、物性によらず Δp^* と u^* の関係は $u^*=1.0$ の範囲で一本の直線で表現でき、 $u^*>1.0$ では $\Delta p^*=1.0$ 一定となった。

PVC
 $N_s = 1.5 [\text{rps}]$
 $R_b = 1.52$
 $R_p = 0.059$

図4 圧力損失比 Δp^* と粉粒体流速 F の関係

3.2 圧力損失に及ぼす操作条件の影響

i) 粉粒体流量 F

粉粒体流量 $F [\text{kg/sec}]$ と Δp^* の関係を図4に示した。 F が0からわずかに増加する、すなわち、流出開始時に Δp^* はわずかに減少する傾向を示すが、いったん流出を始めると F が増加しても Δp^* はほぼ一定値を示した。

ii) 回転速度 N_s

空気流速を $u = 8.0 \times 10^{-3} [\text{m/sec}]$ に保ったまま攪拌羽根の回転速度 $N_s [\text{rps}]$ を変化させた場合の Δp^* の変化を図5に示した。図中の記号は羽根形状の種類を示している。 Δp^* は羽根によってその値が異なるが N_s が増加するにつれて減少した。これは高速攪拌になるに従って粉粒体層の羽根による流動化が活発になり、充てん状態が疎に、すなわち、空隙率が大きくなるためと考えられる。特にリボンのピッチの大小によりまた、リボン幅の大小により Δp^* の変化の程度が異なっている。しかし全体として Δp^* と N_s の間にはほぼ次の関係が成立した。

$$\Delta p^* \propto \exp(-N_s/5) \quad \dots\dots(5)$$

3.3 圧力損失に及ぼす攪拌羽根形状の影響

攪拌羽根の形状を特徴づける代表寸法比として、外巻きリボン羽根幅 b_0 、ピッチ P_0 および羽根外径 D_0 を用いて、リボン幅比 $R_b (= b_0/D_0)$ とリボンピッチ比

key	R_p	R_b
○	0.51	0.059
□	1.52	
△	2.03	
■	1.52	0.081
●		0.153

図5 圧力損失比 Δp^* と羽根回転速度 N_s の関係

図6 圧力損失比 Δp^* と羽根幅比 R_b の関係

図7 圧力損失比 Δp^* と羽根ピッチ比 R_p の関係

$R_p (=P_0/D_0)$ を定義し、これらの寸法比と Δp^* の関係を求めた。

i) リボン幅比 R_b

リボンピッチ比 R_p が一定 (1.52) で幅比 R_b の異なる羽根を用いて回転速度 $N_s=5.0$ [rps] の条件下で u を変化させた場合の Δp^* と R_b の関係を図6に示した。 Δp^* は R_b が大きい程減少する傾向にあった。羽根幅が広い場合には回転による粉粒体の移動量が多く、粉粒体層の充てん状態が疎になるためと考えられ図の直線の勾配からつぎの関係を得た。

図8 圧力損失比 Δp^* と羽根間隔 $(1+h_0/D_0)$ の関係

図9(a) 圧力損失比 Δp^* と粉粒体層高 H の関係

図9(b) 圧力損失比 Δp^* と羽根外径 D_0 の関係

$$\Delta p^* \propto R_b^{-1.0} \quad \dots\dots(6)$$

ii) リボンピッチ比 R_p

図7にはリボン幅比 $R_b=0.52$ 一定とした場合の Δp^* と R_p の関係を示した。 Δp^* は R_p の増加と共に減少し

$D_0 = 0.058 \sim 0.24$ [m]
 $R_p = 0.051 \sim 2.03$ [-]
 $R_b = 0.047 \sim 0.153$ [-]
 $H_s/D_0 = 0 \sim 1.0$ [-]
 $N_s = 0 \sim 5$ [rps]

図10 実験結果の相関

ており、これは R_p が大きい羽根では単位粉粒体層高当りのリボンの巻き数が少なくなっており羽根の通過部分以外の粉粒体層が密充てん状態になっているものと思われる。図より Δp^* と R_p の間にはつぎの関係があった。

$$\Delta p^* \propto R_p^{0.5} \quad \dots\dots(7)$$

iii) 羽根取り付け間隔比 h_s/D_0

粉粒体の混合効果を上げるためにリボン羽根をいくつかの小リボンに分割し多段にして軸に取り付けた形式のものについての Δp^* と $(1+h_s/D_0)$ の関係を図8に示した。 h_s は羽根の取り付け間隔であり D_0 は羽根外径である。 Δp^* は羽根間隔が大きくなるに従って増加しており、このことは羽根と羽根の間にある粉粒体は明らかに羽根の直接通過する部分に比較して密充てん状態にあることがわかる。 $(1+h_s/D_0)$ が1の場合は h_s が0で連続巻き羽根に相当する。図から Δp^* と $(1+h_s/D_0)$ の間にはつぎの関係が成立した。

$$\Delta p^* \propto 1 + \frac{h_s}{D_0} \quad \dots\dots(8)$$

3.4 圧力損失に及ぼす装置寸法の影響

図9(a)(b)に攪拌羽根の長さすなわち粉粒体層高 H と羽根回転半径 D_0 が Δp^* に及ぼす影響をそれぞれ示した。使用した羽根はいずれもリボン羽根である。(b)の場合は

図11 圧力損失による所要動力 P_{gas} 対ガス流速 u

R_p , R_b 一定の幾何学的に相似な形状をしている。図より Δp^* は H および D_0 に無関係に一定値になることがわかる。

4. 圧力損失の実験式

圧力損失比 Δp^* と各パラメータ間の関係(5)~(8)を整理すると次式のように表わせる。

$$\Delta p^* = K_{gas} R_p^{0.5} R_b^{-1} (1+h_s/D_0) \exp(-N_s/5) u^* \quad \dots\dots(9)$$

ここで K_{gas} は実験定数である。 Δp^* の実測値を(9)式に従ってプロットすると図10のようになる。図より各種条件で得られたデータは傾き45度の直線にほぼのっており、 K_{gas} は0.029となった。したがって攪拌移動層の圧力損失 Δp は操作条件、装置形状、代表寸法、粉体物性および単純な円筒に粉粒体を充てんしたときの空気流速と圧損の関係(3)および(4)式の関係を用いて算出し得る。そして空気吹き込みに要する通気所要動力 P_{gas} [Kg·m/sec] は槽断面積 A [m²]、空気流速 u [m/sec] そのときの圧力損失を Δp [Kg/m²] とすると次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 P_{gas} &= Au \Delta p = Au \Delta p^* \Delta p_{mf} \\
 &= K_{gas} Au [R_p^{0.5} R_b^{-1} (1+h_s/D_0) \exp(-N_s/5) u^*] \\
 &\quad \times [H \rho_a g / g_c] \quad \dots\dots(10)
 \end{aligned}$$

10式の計算値と実測結果を図11に示した。これより計算値と実測値はほぼ一致していることがわかる。

5. 結 言

攪拌型移動層装置の圧力損失を種々の条件下で実測してつぎのような結果を得た。圧力損失は粉粒体の充てん状態と流動状態に大きく依存しており、(i)粉粒体の流下移動あるいは機械的攪拌による流動化によって圧力損失

は減少する。(ii)粉粒体の流動状態は攪拌羽根の形状により異なり、ピッチ比の大きいものほど圧力損失は大であり、一方、幅の大きい羽根ほど小さい値となる、(iii)攪拌羽根の直接通過しない粉粒体層は密充てん状態となり圧

力損失は大きい。(iv)以上の実験結果に基づいて、空気流速が最小流動化速度以下 ($u^* \leq 1.0$) の操作条件で、圧力損失と各パラメータ間の関係を整理して実験式(9)を得た。

使 用 記 号

A : 槽断面積	[m^2]	P_0 : 羽根(リボン)ピッチ	[m]
b_0 : 攪拌羽根幅	[m]	Δp : 圧力損失	[Kg/m^2]
D_0 : 攪拌羽根外径	[m]	Δp^* : 圧力損失比 (2)式	[$-$]
D_r : 槽内径	[m]	Δp_{mf} : 流動化開始時における圧力損失	[Kg/m^2]
d_p : 粒子径	[m]	R_b : 羽根幅比(b_0/D_0)	[$-$]
F : 質量流量	[kg/sec]	R_p : ピッチ比(P_0/D_0)	[$-$]
g : 重力の加速度	[m/sec^2]	u : 空気流速	[m/sec]
g_c : 換算係数	[$kg(m/sec^2)/Kg$ 重]	u^* : 空気流速比 (1)式	[$-$]
H : 粉粒体層高	[m]	u_{mf} : 流動化開始速度	[m/sec]
H_r : 攪拌槽高	[m]	ϵ : 粉粒体充てん層空隙率	[$-$]
h_s : 羽根取り付け間隔	[m]	μ_f : 空気粘度	[$kg/m \cdot sec$]
K_c : 実験定数 (3)式		ρ_a : 粉粒体層見掛け密度	[kg/m^3]
K_{gas} : 実験定数 (10)式		ρ_f : 空気密度	[kg/m^3]
N_s : 回転速度	[rps]	ρ_s : 粒子密度	[kg/m^3]
P_{gas} : 空気吹込み動力	[$Kg \cdot m/sec$]	ϕ_c : 形状係数 (Leva の形状係数)	[$-$]

引 用 文 献

- 1) 永田進治ら：化学機械，16，301 (1952)
- 2) S.Makishima and T.Shirai : *J. of Chem. Engng. of Japan*, 2 (No. 2) 224 (1969)
- 3) G.Rios *et al*: *Chem. Eng. J.*, 13, 101 (1977)
- 4) 矢野武夫，佐藤宗武ら：粉体工学研究会誌，11 (No. 2) 67 (1974)
- 5) 同上：同誌，11 (No. 2) 76 (1974)
- 6) M.Leva: *A.I.Ch.E.J.*: 6, 688 (1960)

Author's Abstract

Pressure Drop of a Moving Bed By Mechanical Agitation

by

Munetake SATOH, Yutaka HIRATA, Yasuo KITADA and Kei MIYANAMI

(Department of Chemical Engineering, University of OSAKA Prefecture)

The pressure drop characteristics through a solid-particles moving bed using mechanical agitators are influenced by various factors such as the physical properties of the solid particles, the agitator geometry and the operating conditions. The present paper describes the results of an experiment on the relationship between the pressure drop and the factors in the moving bed with solid-air counter-current flow. The bed is operated at an air velocity less than minimum fluidization velocity u_{mf} . A double herical ribbon is employed as an impeller.

The decrease in pressure drop with increase in the void fraction due to solids moving downward and agitation has been measured by using pressure sensing sets along the column height.

A general correlating equation for the pressure drop of the solid-gas moving bed has been provided in terms of the pitch ratio of the impeller, its width ratio its spacing distance and the gas flow rate and the rotary speed of the impeller.