粒子を垂直管にて上昇輸送させる場合の圧力損失について

(粒体空気輸送に関する研究)*

原田幸夫** 市毛 進*** 生井春夫**** 橋 明*****

Pressure Drops in Vertical pipe line of pneumatic granular-body conveyor

(Studies on pneumatic conveyance of granular-body)

by Sachio HARADA, Susumu ICHIGE, Haruo NAMAI and Akira TACHIBANA

The pressure drops, when the velocity of particles accelerated by the air current increases from zero to the terminal velocity while passing through a vertical pipe, were observed and photographed. The experimental apparatus is shown in Fig. 1. The results are shown in Fig. 2~Fig. 9, inclusive.

The pressure drops at the lower pipe, where the particles are mixed, are particularly large, which cannot be neglected when the system is design.

We have explained the results theoretically by our way in which we classified pressure drops into three parts, that is, the pressure drop due to accelerating particles, that due to the friction loss of air and the static pressure difference.

1. 緒 言

粉粒体を空気輸送する場合、輸送管内に生ずる圧力損失は粉粒体（大きさ、比重、形状、混合比、粒度分布）、輸送管（内径、管の傾斜程度、管内壁）、運転状態（風速、湿気の程度）等に影響され、空気の場合の数倍から、はなはだしい場合には十数倍にも及ぶ。したがって粒体輸送の設計計画に当っては輸送管内の圧力損失を決定することが重要な問題になっている。かかる空気輸送において一般に風速は一定の下に行われる。したがって粒子群の運動状態と一様に進行するものと考えて計算されるのが一般である⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし粒子は進行に伴い運動状態を変えてゆく場合が多い。たとえば垂直管にて上昇輸送する場合、下端の曲管において粒子の速度は一度落ち、上昇するに従って次第に加速されて終速度に近づく。この加速区間はあんがい長い。しかもこの加速区間における圧力損失は特に大きい。筆者らは垂直輸送管にて粒子を上昇輸送する場合、粒子加速により圧力損失がいかに影響されるかにつき研究した結果を報告する。

2. 実験装置および輸送粒体

実験装置は第1図の略図に示すごとく垂直管（P）の上端にサイクロン（C）を経て、送風機（F₁, F₂, F₃）

第1図

を取付け、この送風機により垂直管の下端のベルマウス（B）より空気を吸い込む。ベルマウスの直ぐ上に取付ける支管（S）より入れる粒体は空気とともに垂直管内を吸い上げられ、サイクロンに至って空気と粒体は分離される。粒体のみサイクロン下部を通してタンク（T₁）、粒体充てん層（H）を経て再び支管に戻るようにする。サイクロンで粒体より分離された空気は送風機に吸い出されて外気に放出される。空気の流量は前述のベルマウスで測定される。粒体の輸送量はサイ

* 昭和31年4月2日 第33期通常総会講演会において講演。
原稿受付 昭和31年4月16日。

、* 正員、茨城大学工学部。

****、***** 学生員、茨城大学工学部。

(a) A 砂, 風速=18 m/s

(b) A 砂, 風速=21 m/s

(c) A 砂, 風速=24 m/s

(d) A 砂, 風速=27 m/s

第 2 図

クロン下部より落ちる粒体を、弁 (V) によりタンク (T_2) に導き、このタンクにたまる量とその間の時間を測定することによって決定する。ごく少量の微細な粒体はサイクロンで分離されずに送風機に向うが、これは送風機吐出口に設けた布製のフィルタで受けることにする。粒体の量は十分にその輸送量測定中も粒体充てん層の粒体の高さを常に一定にして粒体の

支管に落ちる量を変えぬようにする。また粒体の量の加減は充てん層下部に調節用オリフィスを設けて、その径を変えて行ふ。圧力損失は図の $P_0, P_1, P_2, \dots, P_9$ の各点の静圧をマンオメータで測定することにより決定する。

輸送粒体としては砂を用い、これは多質の浜より採取せるもので十分水洗いし

第 1 表 砂の大きさ

No.	最大径 μ	最小径 μ	平均径 μ	比重 ρ_s
A	833	495	664	2.703
B	495	240	368	2.703
C	240	147	194	2.856

て乾燥の上、更に砂鉄を除いたものをふるいにて第 1 表のごとく 3 種の大きさに分けた。

実験はまず送風機の回転数を加減しながら砂粒体の混合量いかにかわらず一定の風量を吸い込ます。砂粒体は充てん層、支管を通して一定の割合で輸送管内に混入させる。この実験はある風速について砂粒体の混合量を変えて数回行い、次に風速を変えて同様の実験を繰返す。

3. 実験結果

第 2 図より第 4 図までの各点印はすべて縦軸に輸送管の距離をとり、横軸に各位置における圧力損失 (粒子混合始めの位置 $y=0$ で圧力損失零をとる) をとった場合の図を示す。第 2 図が A 砂、第 3 図が B 砂、第 4 図が C 砂の場合である。図中 $a=1, 2, \dots, 5$ とあるが a は混合比 (混合流体内の粒子群と空気との重量比) を示す。これらの実験結果より共通点を上げると次のごとくなる。空気

のみの場合は圧力損失は直線的に上昇するが粒子が混入されると混入される下端から急に損失を増し輸送管の長さが本実験のごとく 4 m 程度では上端の方でも圧力損失の増加率が一定とならない。しかもこの増加率は下端で最大となる。下端では粒子の速度が零で、これが上昇されるに従って加速され、終速度に近づくわけであるが、この粒子の加速のエネルギーが圧力損失となって特に垂直管下端において大き

(a) B 砂, 風速=18 m/s

(b) B 砂, 風速=21 m/s

(c) B 砂, 風速=24 m/s

(d) B 砂, 風速=27 m/s

第 3 図

く現われると考えられる。次に A, B, C の砂の場合を比較してみるに前述のごとく A, B, C は大, 中, 小の砂であるが小さい砂ほど圧力損失が大きい。比重はほとんど同じであるから同一の混合比に対して管内を輸送される粒子の数は小さい砂ほど多くなるはずである。このために小さい粒子群の場合ほど圧力損失が大にな

ると考えられる。

4. 圧力損失の理論

4.1 粒子加速ならびに摩擦による圧力損失 1 個の粒子が上昇気流により噴き上げられる場合の運動方程式は

$$m\alpha = C_D \frac{\gamma_F}{2} (v_F - u_s)^2 S - m \frac{\gamma_s - \gamma_F}{\gamma_s} g \quad \dots (1)$$

ただし, α = 粒子の加速度
 C_D = 粒子の抗力係数
 u_s = 粒子の上昇速度
 S = 粒子の断面積
 m = 粒子 1 個の質量
 γ_s = 粒子の単位体積当り重量
 γ_F = 空気の単位体積当り重量
 v_F = 空気の上昇速度
 g = 重力の加速度

にして粒子を直径 D の球と考えれば $S = \frac{\pi}{4} D^2$, $m = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \gamma_s$, また $g' = \frac{\gamma_s - \gamma_F}{\gamma_s} g$ とおいて

$$\alpha = \frac{3}{4} \frac{C_D \gamma_F (v_F - u_s)^2}{\gamma_s D} - g' \quad \dots (2)$$

粒子の終速度を u_m とすれば

$$u_m = \sqrt{\frac{4 \gamma_s g' D}{3 C_D \gamma_F}} \quad \dots (3)$$

にて表わされる。

なお C_D の決定に当ってはレイノルズ数の式 $R = u_m D \gamma_F / \mu_F$ (ただし μ_F は空気の粘性係数) と (3) とより u_m を消去せる $C_D R^2 = 4 g' \gamma_s \gamma_F D^3 / 3 \mu_F^2$ の式において右辺を算定し $C_D R^2 = \text{const.}$ の曲線を球に関する $C_D - R$ 線図に描いて $C_D - R$ 曲線との交点より直ちに求められる。これより u_m の値も決定する。

さて (2)(3) 式より

$$\alpha = \left[\left(\frac{v_F - u_s}{u_m} \right)^2 - 1 \right] g' \quad \dots (4)$$

すなわち $\frac{du_s}{dt} = \left[\left(\frac{v_F - u_s}{u_m} \right)^2 - 1 \right] g'$

これより粒子の速度 u_s を求めれば

$$u_s = v_F - u_m \frac{(v_F + u_m) + (v_F - u_m) e^{-\frac{2g't}{u_m}}}{(v_F + u_m) - (v_F - u_m) e^{-\frac{2g't}{u_m}}} \quad \dots (5)$$

(5) を (4) に代入すれば

(a) C 砂, 風速=18 m/s

(b) C 砂, 風速=21 m/s

(c) C 砂, 風速=24 m/s

(d) C 砂, 風速=27 m/s

第 4 図

$$\alpha = \frac{4g'(v_F + u_m)(v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}}{[(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}]^2} \quad \dots\dots(6)$$

次に粒子の上昇距離 y は (5) より

$$y = \int u_s dt = (v_F - u_m)t + \frac{u_m^2}{g'} \log \frac{2u_m}{(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}} \quad \dots\dots(7)$$

上昇風速 v_F の空気により粒子群が加速上昇される場合に要する圧力損失を垂直微小距離 dy につき dp_1 とすれば

$$dp_1 = \frac{\gamma_s'}{g} \alpha dy \quad \dots\dots(8)$$

ただし

γ_s' = 混合流体単位積内の粒子群の重量

にして

e = 混合流体内の粒子群と混合流体の容積比

a = 混合流体内の粒子群と空気との重量比

$$\text{とすれば } a = \frac{\gamma_s e}{\gamma_F(1-e)} \quad \therefore e = \frac{a\gamma_F}{\gamma_s + a\gamma_F}$$

$$\text{したがって } \gamma_s' = e\gamma_s = \frac{a\gamma_s\gamma_F}{\gamma_s + a\gamma_F}$$

実験上 a は 10 以下の数値で, かつ $\gamma_s \gg \gamma_F$ であるから

$$\gamma_s' = a\gamma_F \quad \dots\dots(9)$$

と見なせる. (9) を (8) に代入して

$$dp_1 = \frac{a\gamma_F}{g} \alpha dy \quad \dots\dots(10)$$

したがって $y=0$ において速度零の粒子群が一定風速 v_F により連続上昇せられる場合 $y=0$ より $y=y$ までに粒子加速に要する圧力損失は

$$p_1 = \frac{a\gamma_F}{g} \int_0^y \alpha dy \quad \dots\dots(11)$$

(11) に (6), (7) の α, y の値を代入して計算すると

$$p_1 = \frac{a\gamma_F}{g} \times \left[\frac{2u_m^2(v_F + u_m)^2}{\{(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}\}^2} - \frac{2u_m(v_F + u_m)^2}{(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}} + \frac{(v_F + u_m)^2}{2} \right] \quad \dots\dots(12)$$

垂直円管内を平均風速 u_F で空気が上昇する場合当然のことながら軸心に

においては風速最大となり内壁近くでは風速は零に近くなる. このような状態の下に粒子群が上昇せられる場合, 内壁近くでは粒子は上昇され難く軸心近くの風速により多くの粒子は上昇せられる. なお粒子群が管内を上昇せしめられる場合, 当然それによる摩擦損失があるわけである. 円管内の速度 v_F を円管内の平均風速 u_F より大きくとって粒子加速による損失 p_1 に

第 5 図

粒子摩擦による損失を含めることにする。今の所 v_F と u_F との理論的關係はわかっていない。当実験では第 6 図にも示すごとく

第 6 図

$v_F = 2.0 u_F$	A ($D = 664 \mu$) 砂の場合
$= 1.7 u_F$	B ($D = 368 \mu$) 砂の場合
$= 1.6 u_F$	C ($D = 194 \mu$) 砂の場合

と仮定した。

4.2 空気の管摩擦による圧力損失 平均風速 u_F の空気が内径 d の円管内を通る場合の圧力損失を管の長さ y につき p_2 とすれば

$$p_2 = \lambda \frac{y}{d} \frac{\gamma_F u_F^2}{2g} \quad (13)$$

となる。ただし λ は管内の抗力係数。

4.3 静圧損失 垂直円管に粒子群が上昇しつつある場合、円管の長さ y の間には、この間に含まれる粒子群の重量による静圧差を静圧損失ということにして p_3 で表わせば

$$p_3 = \gamma_s' y = a' \gamma y \quad (14)$$

4.4 全圧力損失 $y=0$ において速度零の粒子群が内径 d の垂直円管内を風速 u_F の空気によって上昇させられる場合の $y=0 \sim y$ 間の全圧力損失を p とすれば、これは粒子群加速に要する圧力損失と管摩擦

損失と静圧損失との和と考えることにより

$$\begin{aligned} p &= p_1 + p_2 + p_3 \\ &= \frac{a' \gamma_F}{g} \left[\frac{2u_m^2 (v_F + u_m)^2}{\{(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}\}^2} - \frac{2u_m (v_F + u_m)}{(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}} + \frac{(v_F + u_m)^2}{2} \right] \\ &\quad + \lambda \frac{y}{d} \frac{\gamma_F u_F^2}{2g} + a' \gamma y \quad (15) \end{aligned}$$

輸送粒子として選んだ砂は第 1 表に示せるとく大きさにより大別して A, B, C の 3 種に分けた。厳密には各分類の中でも大きさはそれぞれ異なるわけであるが計算を容易にするためにそれぞれの平均径をとり、かつこの径をもつ球と仮定した。A, B, C それぞれの終速度 u_m を算定し、(15) の式を用い、全圧力損失を計算した結果を第 2 図より第 4 図の実験結果にあわせ描いた。各図に示せる実線がこの理論値である。なお (15) 式の内粒子加速に要する圧力損失 p_1 に関する式 (12) は時間 t の関数となっているから、この場合は (7) を使わず粒子の上昇距離 y とそれに要する時間 t の関係を求め (12) より p_1 と時間 t との関係を求めて t を仲介として上昇距離 y に対する p_1 の値を計算した。これら理論結果 (実線) を概観するにだいたい実験 (点印) と傾向を同じくし、特に B 砂はよく一致する結果を得た。

なお第 1 図の垂直上昇輸送管の P_6 から P_8 までの全圧力損失 p を縦軸にとり粒子群と空気との混合比 a を横軸にとり p と a との関係を示せば A, B, C 各砂の場合につきそれぞれ第 7~9 図のごとくになる。図中点印は実験値であり実線は理論値であって上昇輸送管のこの範囲では実験値と理論値はほぼ一致する。

第 7 図 A 砂

第 8 図 B 砂

第 9 図 C 砂

5. 結 言

砂粒体を垂直管にて上昇空気輸送させる場合の圧力損失について当研究から次の事項が認められた。空気のみの場合には圧力損失は垂直管の下端より上端に向い直線的に上昇するが粒子が混入されると、混入される下端より急に上昇を始め輸送管の長さが本実験のごとく 4 m 程度では圧力増加率は増加を続け一定とならない。これは粒子の加速に要する圧力損失が主要原因であることは、かかる考えの下に立てる理論と実験結果とがだいたい一致することから確認出来る。しかもこの粒子の加速に要する圧力損失は粒子の混合される下端において特に大きいから、この粒子加速区間の圧力損失を無視して全体の圧力損失をうんぬんすることは意味ないことになる。粒体の混合量が増すに従って圧力損失が大きくなることは当然であるが同一の混合比に対しては小さい砂ほど圧力損失は大きくなる。これは砂の数がふえることによる。

垂直輸送管にて砂を混入せしめた位置から y m までの距離における上昇する圧力損失は次式にて与えられる。

$$p = \frac{a\gamma_F}{g} \left[\frac{2u_m^2(v_F + u_m)^2}{\{(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}\}^2} - \frac{2u_m(v_F + u_m)}{(v_F + u_m) - (v_F - u_m)e^{-\frac{2g't}{u_m}}} + \frac{(v_F + u_m)^2}{2} \right] + \lambda \frac{y}{d} \frac{\gamma_F u_F^2}{2g} + a\gamma_F y$$

ただし

a = 混合流体内における粒子群と空気との重量比

d = 輸送管の内径

y = 輸送管の長さ

λ = 輸送管の抗力係数

g = 重力の加速度

$$g' = \frac{\gamma_s - \gamma_F}{\gamma_s} g \div g$$

γ_s = 粒子の単位体積当り重量

γ_F = 空気の単位体積当り重量

u_m = 粒子の終速度

u_F = 空気の輸送管内における平均上昇速度

v_F = 粒子を上昇せしめる空気の数

v_F は今のところ実験により定める値で当実験では

$$v_F = 2.0 u_F \quad \text{A 砂}$$

$$= 1.7 u_F \quad \text{B 砂}$$

$$= 1.6 u_F \quad \text{C 砂}$$

とおくと理論値が実験によく一致する。

なお本研究は文部省科学研究費の援助よることを付記して感謝の意を表する。

文 献

- (1) 池森・宗像, 昭和 30 年 4 月 6 日 第 32 期定時総会講演会前刷 No. 410.
- (2) 池森・今木, 昭和 30 年 4 月 6 日 第 32 期定時総会講演会前刷 No. 408.
- (3) 池森・今木・宗像, 昭和 31 年 4 月 1 日 第 33 期通常総会講演会前刷, No. 418.
- (4) 上滝・中須賀, 化学工学, 17 巻 2 号, 64 ページ (昭 28).