621.867.82 : 621.64.01

空気充填法の基礎的研究 第2報⁽¹⁾三雲英之助⁽²⁾ 小門純一⁽³⁾

On the Basic Study of Pneumatic Stowing (2nd Report)

by Einosuke MIKUMO and Junichi KOKADO

In this 2nd report, the authors, from the results of the 1st report, have derived a calculation method to obtain the pressure drop along a straight pipe when the groups of particles of quartz as well as coal are transported in the horizontal pipe, and ascertained that the experimental results were in close accordance with the calculated methods mentioned above.

At first, the calculation method and the experiments were limited in the case of straight and horizontal pipe and the air velocities at inlet and outlet of the pipe are equal. And then they derived the Gasterstädt's experimental formula theoretically using the time base instead of the distance base which was used by Gasterstädt.

Next, the authors discussed the calculation methods required to convey the mass of pieces by the air current in a long pipe, taking into consideration the variation of air density, coefficient of resistance between air and pipe and pieces velocity consequently the variation of air velocities along a horizontal straight pipe and showed some calculation examples.

緒 言

この報告は第1報に述べた事柄を拡張して、粒子群を輸送する場合の所要圧力の求め方を、輸送管が水平で直線的な場合について述べたものである。輸送距離が短い場合には、管入口と出口との間の圧力差が小さいので、空気速度、空気密度などは一定と考えて解析を行い、その結果を変形すれば Gasterstädt の実験式に一致することを示した。また管長が長い場合には、管入口および出口の圧力差が大きいので、空気速度、空気密度、管摩擦係数などの変化を考慮しなければならない。そのために空気の動粘性係数と圧力との間の関係を計算して、それらが簡単な指数かん数で表わし得ることを確かめ、その結果を利用して解析を行った。

輸送距離が短い場合

粒子群を空気で輸送する場合の所要圧力を求めるために、便宜上 i) 各粒子はそれぞれ単一粒子として第1報⁽⁴⁾に述べたと同じ運動をなし、輸送管全長にわたり時間的に均一に分布している。ii) 任意の一粒子の存在は他のすべての粒子の運動状態に影響を及ぼさないものと仮定する。

輸送距離が短い場合には、管入口と出口との間の圧力差が比較的小さいので、空気速度 u (m/s), 空気密度 γ (kg/m³), 管摩擦係数 λ などは一定と考えてさしつかえない。

1) 加速期間の所要圧力 加速期間において、粒子挿入箇所から z 秒を経た所にある $\dot{x}_z$ (m/s) の速度をもつ一粒子によって生ずる抗力 p_b (kg) は

$$p_b = C \cdot S \cdot \gamma (u - \dot{x}_z)^2 / 2g \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに C は粒子の抗力係数, S は粒子の流れの方向に対する投影面積 (m²), g は重力の加速度 (m/s²) である。 C の値は相当広範囲の Reynolds 数に対して一定であるから⁽⁵⁾, 本論文において C の値は不変と考えて論議を進める。粒子の加速期間を z_a 秒とし、運動している粒子群個々の時間的間隔を Δz 秒とすれば、 Δz は給鉱量から計算でき、一般にきわめて小さい値であるから $(u - \dot{x})^2$ と z とを座標軸にとって積分法の基礎的な考え方を利用すれば、加速期間における粒子群のみによる粒子挿入箇所直後の所要圧力 p_{bK} は近似的に次式で表わされる。

$$p_{bK} = \frac{C \cdot S \cdot \gamma}{2g \cdot F \cdot \Delta z} \int_0^{z_a} (u - \dot{x})^2 dz \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに F は輸送管の断面積 (m²) であって、 $\dot{x} = f(z)$ と表わせば上式を計算できる。加速期間の空気のみを輸送するに要する圧力を p_{bL} とすれば、この期間における所要圧力 p_b は

$$p_b = p_{bL} + p_{bK} \quad \dots\dots\dots (3)$$

2) 定速期間の所要圧力および全所要圧力 定速期間における粒子群のみによる全抗力 R_c は、粒子がその加速期間終了後は一定速度 $\dot{x}_c$ で輸送されるものと考え、この期間の長さを z_c 秒とすれば

$$R_c = C \cdot S \cdot \gamma (u - \dot{x}_c)^2 z_c / 2g \quad \dots\dots\dots (4)$$

ゆえに粒子群を輸送するための全所要圧力 $p(\text{kg/m}^2)$ は、定速期間の空気のみによる所要圧力を p_{eL} として

$$p = p_L + p_{eL} + C \cdot S \cdot \gamma (u - u_c)^2 z_c / 2gF \Delta z \dots (5)$$

ここに $p_L = p_{bL} + p_{eL}$ である。以上の考察では、 p を p_L と上式の右辺第2、第3項で表わされる粒子のみによって生ずる圧力とに分けて別々に考えているけれども、厳密にはこのように分けずに解析を行わねばならない。このことに関しては後で述べている。

Gasterstädt は穀物輸送に関する実験の結果、粒子群を輸送するための全所要圧力 p を求める次式を実験的に求め、その妥当性を立証している⁽⁶⁾。

$$p = (1 + M \tan \alpha) p_L \dots (6)$$

ここに M は混合比で、単位時間当りの輸送粒子量 $G_m(\text{kg/s})$ と消費空気量 $G_L(\text{kg/s})$ との比 G_m/G_L で、 $\tan \alpha$ の値は輸送条件により異なる定数である。この式は p/p_L と M との関係は一次かん数で表わしうることを示していて (5) 式から簡単に導くことができる⁽⁷⁾。

3) 実験方法およびその結果 実験材料は石英粒子 -8+10 目ふるい、石炭粒子 -6+8, -8+10, -10+14 目ふるいの4種類を、輸送管は内径 22 mm のガラス管を用い、風速は約 8~14 m/s の範囲で実験を行った。実験には一定重量、一定の大きさの材料を粒子挿入器に入れて密せんし、活せんを用いて気流中に連続的に挿入し、その挿入に要した時間を 1/100 秒時計で測定して、単位時間当りの輸送量を求め、それと同時に、輸送管各点のマノメータを1箇所に集めて、写真による同時撮映により管長に沿う圧力分布曲線を求めて計算結果と比較した。すなわち使用材料の直径 $d(\text{m})$, S , 粒子1個の重量 $G(\text{kg})$ などは500個以上の粒子群の重量を化学天びんで秤量し、その平均値として求められた G から、粒子が完全な球体であると仮定した時の換算直径 d を求め $\pi d^2/4$ を S とした。抗力係数 C は空中浮遊速度 $u_s(\text{m/s})$ の測定から、約20個の平均として、石英については1.40を、石炭については1.00の値を得た。この場合 Reynolds

数は約1000~2000で、ほぼ一定の範囲内にある C の値が求められたと考えてよい⁽⁸⁾。 C の値を検討するため、第1図に示すように内径 22 mm のガラス管を垂直に立て、その中に石英粒子群を浮遊せしめ、浮遊粒子数 n のみによって生ずる圧力上昇 p_3 を次式 (7)

$$p_3 = n \cdot C \cdot S \cdot \gamma u_s^2 / 2g \cdot F \dots (7)$$

第1表

浮遊速度 m/s	浮遊粒子数	p_3 計算値 mm W. S.	p_3 実測値 mm W. S.
6.68	279	11.1	11.0
6.73	93	3.8	3.4
6.49	216	8.2	8.6
6.99	228	10.0	8.6
6.87	93	4.0	4.0
6.30	272	9.7	9.8
6.30	222	7.9	8.6
5.79	370	11.1	12.6

から求めた結果、第1表に示すように実験結果とはほぼ一致することがわかったので、粒子群が運動する場合の各粒子の抗力係数として、この程度の管内粒子の分布状態であれば、粒子が1個だけある場合について求めた C の値を用いても大して誤りでないことを確かめた。

次に反発係数 φ は石英の場合は第1報⁽⁹⁾ のとおりで $\varphi = 96\%$ 、石炭の場合は第1報と同じ方法で測定した結果 $\varphi = 90\%$ であった。

以上の予備実験の後上述の方法で実験を行い、粒子の単位時間当りの輸送量と所要圧力との関係を求め、この実験条件を基にして次のような計算を行った。まず粒子が跳躍しながら輸送される場合、今計算しようとする実験条件の下で、1個の粒子を輸送した場合についての粒子の運動状態を計算してその加速期間および定速期間を求める。その結果 $\bar{x}$ と z との関係は

第2図

第2図に実線で示すようにこの歯状の曲折線となるけれども、これでは計算ができないのでこの加速期間のみを同図点線で示す近似曲線 (8) 式で表わすことにする。

$$\bar{x} = hz / (1 + z) + fz \dots (8)$$

上式に先に求めた $\bar{x}$ と z との関係を代入して定数 h

第1図

第 9 図

い圧力変化は第8図に示すような多数の圧力測定孔を特に設けて測ったものである。

輸送距離が長い場合

輸送距離が長い場合には、管の入口と出口との間の圧力差が大きくなるので、 u , γ , λ , $\bar{x}$ などの変化を考慮して、 $\bar{x}$ が急激に変化する粒子の加速期間の所要圧力は(3)式から求め得るので、 u の変化のために $\bar{x}$ が変化する定速期間について述べる。

1) 空気の動粘性係数と圧力との関係 空気の動粘性係数を $\nu(\text{m}^2/\text{s})$, 粘性係数を $\eta(\text{kgs}/\text{m}^2)$, 密度を $\gamma(\text{kg}/\text{m}^3)$ とすれば

$$\nu = \eta / \gamma \quad \dots\dots\dots(11)$$

η の値は温度 $t(^{\circ}\text{C})$ のみにより変化するもので

$$\eta = 1.821 \{1 + 0.00276(t - 15)\} \times 10^{-8} \quad \dots\dots\dots(12)$$

γ の値は

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{1.2931}{9.80665} \times \frac{273}{273+t} \times \frac{H - 0.378\psi p_s}{760} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに H は温度 t , 重力の加速度 $9.80(\text{m}/\text{s}^2)$ における気圧 (mm Hg), ψ は相対湿度, p_s は温度 t における水蒸気の飽和圧力 (mm Hg) である⁽¹⁰⁾。式中 $\psi = 0.75$ とし, p_s の値は “International Critical Table” 記載の値を採用して, 圧力 750 mm Hg から 1000 mm Hg までは 10 mm Hg 飛びに, 1000 mm Hg から 4700 mm Hg までは 50 mm Hg 飛びに, 温度は -10°C から 40°C までを 5°C 飛びに計算を行った。その結果を $\log \nu / \nu_0 - \log p / p_0$ 曲線で表わせれば第10図に示すようにほぼ直線的になるので近似的に次式が成立する。

$$\nu = \nu_0 (p / p_0)^m \quad \dots\dots\dots(14)$$

ここに p_0 および ν_0 は, それぞれ温度 t における標準大気圧および気圧 (kg/m^2), ν_0 は温度 t , 圧力 p_0 における ν の値である。 ν_0 および m は温

第 10 図

度によって変る定数で, 第2表に示す値をとる⁽¹¹⁾。

第 2 表

$t^{\circ}\text{C}$	$\nu_0 \text{ m}^2/\text{s}$	m
-10	1.2396×10^{-5}	-1.000457
-5	1.2824	-1.000630
0	1.3261	-1.001473
5	1.3703	-1.001404
10	1.4167	-1.001923
15	1.4639	-1.002777
20	1.5125	-1.003746
25	1.5629	-1.005194
30	1.6154	-1.006963
35	1.6704	-1.009005
40	1.7283	-1.012168

2) 所要圧力の求め方

輸送管の任意の部分に第

11図に示すように dn 個の粒子を含む短い距離 dl を取り, その間の圧力変化を dp とすると, dp は空気と管壁の摩擦による項と, 粒子が存在するために生ずる

第 11 図

抗力による項とから成るから次式が成立する。

$$d\left(-\frac{p}{p_0}\right) = \lambda \frac{dl}{D} \cdot \frac{u^2}{2g} \cdot \frac{\gamma}{p_0} + \frac{1}{F} \frac{C \cdot S \cdot \gamma}{2g} (u - \bar{x})^2 \frac{dn}{p_0} \quad \dots\dots\dots(15)$$

ここに λ は管摩擦係数は, D 管直径 (m) である。上式において管内を流れる空気は等温変化をなすものと仮定すれば, 温度一定の条件下において λ , u , γ などはすべて圧力 p のかん数として表わすことができる。すなわち λ は Reynolds 数 R_e のかん数で, $R_e = 3 \times 10^3 \sim 10^5$ の範囲内では Blasius によれば $\lambda = 0.3164 R_e^{-0.25}$ で表わし得るから, これを一般に $\lambda = a(R_e)^b \quad \dots\dots\dots(16)$ とする。 R_e は Q_0 を圧力 p_0 における空気流量 (m^3/s) とすれば

$$R_e = p_0 Q_0 D / \mu F \nu \quad \dots\dots\dots(17)$$

また前述のように $\nu = \nu_0 (p / p_0)^m$ とかけるから

$$\lambda = a(4Q_0)^b p^{mb+1} / (\pi \nu_0 D)^b p_0^{mb+1} \quad \dots\dots\dots(18)$$

絶対温度を $T(^{\circ}\text{K})$, 空気のガス恒数を R とすれば

$$\gamma = p / RT \quad \dots\dots\dots(19)$$

ゆえに $\lambda u^2 \gamma dl / 2g D p_0 = A (p / p_0)^{mb+1} dl \quad \dots\dots\dots(20)$

ここに $A = a(4Q_0)^{2+b} / 2g R T \nu_0^b \pi^{2+b} D^{5+b}$ は一定同様に第2項を変形する。この際 u と $\bar{x}$ との比は一定であると仮定し, 単位時間当りの給鉱量を N (個/s) とすれば

$$\frac{\bar{x}}{u} = \phi, \quad \frac{dn}{dl} = \frac{N}{\phi} \left(\frac{p}{p_0} \right) \frac{F}{Q_0}$$

ゆえに $C \cdot S \cdot \gamma (u-x)^2 dn / 2gFp_0 = Edl \dots\dots\dots(21)$

ここに $E = C \cdot S \cdot Q_0 (1-\phi)^2 N / 2gRT\phi F^2 = \text{一定}$

ゆえに (15) 式は

$$d\left(\frac{p}{p_0}\right) = \left\{ A \left(\frac{p_0}{p}\right)^{mb+b+1} + E \right\} dl \dots\dots\dots(22)$$

上式において $(mb+b+1)$ の値を考えると, 第2表に示したように m は一般に (-1) に近い値を取るから, 近似的に $mb+b+1=1$ としてさしつかえない。ゆえに初期条件として $l=0$ のとき $p/p_0 = p_a/p_0$, $l=l$ のとき $p/p_0 = p/p_0$ とすれば $E \neq 0$ すなわち $N \neq 0$ である範囲において

$$l = A^{-1} J^{-2} p_0^{-1} [J(p-p_a) - p_0 \log_e \{(p_0+pJ)/(p_0+p_aJ)\}] \dots\dots\dots(23)$$

ここに p は所要圧力, p_a は管出口圧力 (大気圧), $J = E/A$ である。もし $N=0$, すなわち管内に粒子がなく単に空気だけが流れているときには

$$p_L = (p_a^2 + 2Alp_0^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(24)$$

ここに p_L は空気のみを輸送するに要する圧力である。

次にこの問題を管長が短い場合に行ったように, 所要圧力 p を空気だけによる圧力 p_L と, 粒子のみによると考えられる圧力 p_K とに分けて考えると, p_L は (24) 式から求められ, p_K は

$$d(p/p_0) = E \cdot dl \dots\dots\dots(25)$$

初期条件を, $l=0$ のとき $p=p_a$, $l=l$ のとき

$p=p_K+p_a$ とすれば

$$p_K = p_0 El \dots\dots\dots(26)$$

$$\therefore p = p_L + p_K = p_0 El + (p_a^2 + 2Alp_0^2)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(27)$$

上式は (23) 式を簡単にした式である。

3) 計算例 計算結果と共に第5図に示した -6 +8 目ふるいの石炭を輸送した実験結果についてあらためて計算すれば次のようになる。

全輸送距離 $l = 15.46 \text{ m}$, 加速期間の長さ $l_a = 2.70 \text{ m}$,

定速期間の長さ $l_c = 12.76 \text{ m}$, $u = 9.20 \text{ m/s}$,

$\phi = 0.456$, $Q_0 = 3.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, $D = 2.2 \times 10^{-2} \text{ m}$,

$t = 30^\circ\text{C}$, $k = 1.615 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $m = -1.0$, $C = 1.0$,

$S = 5.47 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, $N = 2.38 \times 10^3 \text{ 個/s}$,

$p_a = 10202 \text{ mm H}_2\text{O}$ で, この実験設備においては

第 12 図

$a = 0.3536$, $b = -0.25$ である。計算に当っては輸送距離が短いので所要圧力を加速期間と定速期間とに分けて, 上記の値を (3), (23), (27) 式に代入して計算すれば第 12 図に示すような結果が得られ, 実験結果とよく一致する。

次に Maercks の Bergbaumechanik に記載されている計算例について比較計算を行うと次のようになる。

$p_a = 1.1 \times 10^4 \text{ mm H}_2\text{O}$, $Q_0 = 7.986 \text{ m}^3/\text{s}$, $\phi = 0.80$, $l = 300 \text{ m}$, $a = 0.3164$, $b = -0.25$, $D = 1.5 \times 10^{-2} \text{ m}$, $k = 1.615 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $N = 1.667 \times 10^4 \text{ 個/s}$, $t = 30^\circ\text{C}$, $C = 1.0$, $S = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 記載の所要圧力 $p = 3.1 \times 10^4 \text{ mm H}_2\text{O}$ である。この場合は輸送管が長いので全輸

第 13 図

送区間を定速期間として取扱い計算結果を第 13 図に示した。Maercks の計算方法は (27) 式と同じく p_L と p_K とを分けて考え, 粒子は管底をすべりながら輸送され, 粒子と管壁との間の動摩擦係数 $\mu = 0.65$ として計算し図に示す結果を得ている。図からわかるように, 輸送管が長い場合には (23) 式を用いるよりも (27) 式を用いて所要圧力を計算した方が計算が簡単で, また得られる結果が (23) 式の計算結果よりも幾分大きくなるから, 実際の設備設計のための計算方法としては (27) 式の方が

有利であると思われる。

結 論

第1報から述べて来たように、粒子が水平かつ直線的な輸送管内を空気によって輸送される場合の所要圧力の求め方については、粒子が管底をすべりながら輸送される場合も、また主として取扱って来たように、管内を跳躍しながら輸送される場合についても論議した。これらの考え方は粒子が垂直管内を押揚げ輸送される場合についても全く同様に利用できるものと思われる。実際の設備の設計をするための所要圧力 p は、管長が短い場合には(5)式を用い、管長が長い場合には(27)式を用いて計算することにより割合正確に求められる。この場合問題になることは加速期間における粒子の相互干渉による影響である。この問題は未だほとんど研究されていないが、本研究のように計算値と実験値は相当によく一致するので、余り問題にしないで、大きな誤りを惹起することは無いものと思われる。また管長が長い時には簡易化された式(27)を用いる方が(23)式を用いるよりも計算が比較的簡単で、得られる結果が安全側に出るから好都合である。これらの理論的な計算方法は主として模型実験に対してのみ検討されたものであるが、実際の場合にもそのまま適用できるものと思われる。また模型実験の値から実際の事柄を推論する場合には適当な相似律によればよい⁽¹²⁾。

最後にこの研究は文部省科学試験研究費によったこ

とを感謝する。また実験および計算に当って大学院の松永恒忠君の絶大なる御援助があったことを附記して感謝する。

注：—

- (1) 「流体による固体輸送法」第2報、第3報として昭和25年11月および26年3月関西支部講演会にて発表したものをまとめて第2報とした。原稿受付 昭和28年3月14日。
- (2)(3) 正員、京都大学。
- (4) 三雲、小門、機械学会誌、空気充填法の基礎的研究、第1報。
- (5) 三雲、水曜会誌、9巻2号、石炭の水力による押揚運搬法の基礎的研究、第2図～第3図。
- (6) Gasterstädt z., V. D. I. Forschungsheft, 1924. "Die Experimentelle Untersuchungen des Peumatischen Fördervorganges".
- (7) (5)式において

$$I = \frac{C \cdot S \cdot \gamma}{2g} \left\{ \int_0^{t_0} (u-x)^2 dt + (u-x_0)^2 t_0 \right\}$$
 とおけば $p = (1 + I/p_L F \Delta Z) p_L$
 粒子1個の平均重量を G kg, 単位時間当りの輸送粒子数を N とすれば

$$M = G_m/G_L = N \cdot G/G_L - G/\Delta Z \cdot G_L$$
 今 G_L を一定とすれば輸送管が同一であれば p_L 一定で、粒子が輸送管に挿入される方法および運動の初期条件も同じであれば I も一定となる。

$$\therefore I \cdot G_L / FG p_L = \text{一定} = \tan \alpha$$
 とすれば(6)式を求め得る。
- (8) 前出(5)参照。
- (9) 前出、第1報参照。
- (10) 田丸卓郎、標準大気および高度計の読みの直し、航空研究所報告、1巻12号。
- (11) k, m の値は本研究に対しては第2表に示すほど多くのデータ数を必要としないが、このような表現方法がなされたことがないと思うから参考までにかいておいた。
- (12) 三雲、小門、日本鉱業会誌、66号750号。
 空気充填水平管内の材料の運動と相似律、参照。

621.615.01

吸入空気温度による遠心送風機の性能の変化⁽¹⁾

渡 部 一 郎⁽²⁾

Effect of Inlet Air Temperature on the Performance Characteristics of a Centrifugal Blower

by Ichirō WATANABE

Experiments were performed using a centrifugal blower fitted with a double sided impeller of 300 mm diameter having backward curved vanes to examine the effect of inlet air temperature on the performance characteristics, with particular reference to the variation of pressure ratio. The inlet air temperature was varied from minus 20°C to plus 35°C. The results were found to satisfy the relation previously found by Prof. S. Awano that $r-1$ varies inversely proportional to the absolute inlet air temperature, where r denotes the pressure ratio of the blower. Further, the experimental results were found to satisfy the dimensional relationships established by R. S. Capon and G. V. Brooke. As for axial compressors, it was found that the above-mentioned relation is also applicable from the theoretical point of view.