621, 547:621, 867, 8

空気による粉粒体の輸送に関する研究*

(第4報, 粉粒体の閉そくと吹抜け)

植松 時雄**, 狩野 武***

Conveying Characteristics of Pneumatic Conveyor

(Part 4, Minimum Velocity of Air Flow through a Pipe Required for Conveying Granular Solid and its Pressure as to Blow Off the Plugging Layer of Solids in Pipe)

by Tokio UEMATU and Takesi KANO

The authors have introduced a new formula for a minimum velocity of air flow required for the pneumatic conveyance of solid through a pipe. They have examined experimentally the minimum air quantity required for feeding a solid substance from a feeder of blow tank type. These studies are effective in deciding the air velocity and quantity required for the conveyance of solids through a pipe or to feed them from a feeder.

Moreover they have introduced the formulas for the air pressure required for blowing off the plugging layer of solids in pipe.

1. 緒 言

空気輸送装置の計画にあたっては、まず輸送空気速度を適切に選定することが必要であり、選定の基準は第3報⁽¹⁾で求めたとおりであるが、特殊な粉粒体や特別な輸送に対しては計算式が与える値を適当に修正しなければならない。この場合、まず粉粒体が閉そくしないことが必要である。

一般に空気輸送装置では、何かの理由によって計画した仕様値と異なった条件の下で運転されると粉粒体が閉そくすることが多い。特にタンクに充てんした粉体を空気とともに噴出して供給するブロータンク式供給器では、タンクの大きさ、使用空気量、および供給口に加わる背圧と供給能力との間にある種の関係があって、計画値と異なった条件で運転されると所期の性能が得られなかったり、輸送管に閉そくしたりする。

閉そくの理由は結果的には輸送空気速度の不足にあるが、その原因としては空気源機械の性能低下、配管の空気漏れ、異物の混入、管路および分離機器の抵抗増加、粉粒体の供給過多、流れの脈動による部分的な集積の発生などがあげられる。これらの原因によって閉そくを生ずる場合の限界条件については二、三研究

結果が報告^{(2)~(6)}されているが応用範囲の狭いものであった。特にブロータンク式供給器および閉そく層の吹抜けについての研究は前例がみられない。

本研究では、輸送に必要な最小の空気速度、すなわち閉そくの限界条件を明らかにし、さらに万一粉粒体が閉そくした場合、それを吹抜くために必要な空気の圧力についての計算式を求めることにする。特にブロータンク式供給器についてはタンクの大きさと使用空気量が供給能力におよぼす影響を調べ、閉そくの限界条件を明らかにし、この種の装置を計画する上の基準を得ることにする。

2. おもな記号

 L : 閉そく層の長さ m Q_{a0} : 輸送管出口の圧力状態に換算した使用空気量 m^3/min Q_t : タンクの容積 m^3 $n_0 = Q_{a0}/Q_t$ 1/min, すなわち n_0 は1分間にタンクの容積の何倍の空気量を使用するかを表わす。 P_L, P_0 : 閉そく層の上流側の端、および下流側の端または輸送管出口の絶対圧力 kg/m^2 Δp_x : 閉そく層の下流側の端から上流方向に測った距離 x の間の圧力降下 kg/m^2 u_a, u_{ax}, u_{a0} : 空気速度, 添字の x および 0 はそれぞれ閉そく層の下流側の端から上流方向に測

* 昭和36年3月17日 関西支部第36期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和36年9月28日。

** 正員, 大阪大学工学部。

*** 正員, 日立製作所川崎工場(川崎市鹿島田字向島890)。

った距離 x の点および下流側の端における値であることを表わす. m/s

$\delta_L, \delta_0, \delta_x$: 閉そく層の空げき率, 添字の $L, 0$, および x は閉そく層の上流側の端, 下流側の端, および下流側の端から距離 x のところの値であることを表わす. 空げき率は $1-(\gamma_s'/\gamma_s)$ で与えられると定義する. ここで γ_s' は粉粒体のかさ比重量, γ_s は真比重量である.

ψ_s : 粉粒体粒子の形状係数⁽⁷⁾

$\omega = Q_{si}/Q_t$: 充てん率, すなわちタンク内に充てんした粉体量 Q_{si} m³ とタンク容積 Q_t との比
他の記号は第 1 報⁽⁸⁾の場合と同じとする.

3. 理 論

3.1 輸送に必要な最小の空気速度 一定速度で流れる輸送空気中に粉粒体を供給した場合, 時間 t の後の粒子と空気の速度の比 ϕ は第 3 報 (6) 式

$$\phi = (1 - e^{-2\sqrt{q}t})a / \{(\sqrt{q} - b) + (\sqrt{q} + b)e^{-2\sqrt{q}t}\}$$
 で与えられる.

したがって供給された粉粒体を時間 t の大小にかかわらず輸送し得る最小の空気速度 u_a は第 3 報 (6) 式を 0 とおくことにより $a/(\sqrt{q} - b) = 0$, すなわち $a = 0$ の条件から

$$u_a = u_t(\xi_s \cos \theta + \sin \theta)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる.

(1) 式から, 輸送に必要な最小の空気速度は粉粒体粒子の終速度 u_t , 管壁に対する摩擦係数 ξ_s , および輸送管の傾斜角 θ に関係し, 理論的には混合比に無

第 1 図 輸送管の傾斜角 θ° と粉粒体を輸送し得る最小の u_a/u_t の値との関係

関係であることがわかる.

横軸に輸送管の傾斜角 θ° (ただし θ は第 1 象限の $0 \sim 90^\circ$ の角とする) をとり, 縦軸に輸送に必要な最小の空気速度 u_a と粒子の終速度 u_t との比 u_a/u_t をとって, 摩擦係数 ξ_s のいろいろな場合について (1) 式を計算した結果を図に描くと第 1 図のとおりになる. ただしこの場合の最小の空気速度 u_a は, 一般に粉粒体が管の底をしょう動して輸送されときの空気速度を表わして, 粒子が空気中に浮遊して輸送される場合の空気速度ではない.

3.2 閉そく層を一時に吹抜くために必要な空気の圧力 輸送管のある長さにならって閉そくした粉粒体層が, その層の上流側に働く空気の圧力によって一時に吹抜かれる場合について考える.

第 2 図のとおり, 水平面に対して角 θ 傾斜している内径 D の管に, 長さ L の区間にわたって粉粒体が閉そくして, 下流側に P_0 , 上流側に P_L の空気圧力が働いているとすると, 下流側の端から距離 x の点にとった微小な区間 dx についての力のつりあいは次式で表わされる.

$$\gamma_s'(\pi/4)D^2(\xi_s \cos \theta + \sin \theta) \cdot dx + \xi_s \sigma P_x \pi D \cdot dx = (\pi/4)D^2 \cdot dP_x \dots\dots\dots (2)$$

ここで P_x は距離 x の点における閉そく層内部の圧力で, σP_x はその圧力によって粉粒体が管壁に垂直に押しつけられる圧力を表わしている.

閉そく層内の空げき率は上流側の端で δ_L , 下流側の端で δ_0 であって, 内部では直線的に変化しているとみなすと, 下流側から距離 x の点の空げき率 δ_x は

$$\delta_x = \delta_0 + (\delta_L - \delta_0)(x/L) \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる. したがって, この点のかさ比重量 γ_s' は

$$\gamma_s' = \gamma_s(1 - \delta_x) = \gamma_s[1 - \delta_0 - (\delta_L - \delta_0)(x/L)] \dots\dots\dots (4)$$

で表わされる.

(3) および (4) 式を (2) 式に代入して整理すると次式を得る.

第 2 図 閉そく層に働く力

$$(dP_x/dx) - 4\xi_s \sigma P_x / D = -\{\gamma_s(\delta_L - \delta_0)(\xi_s \cos \theta + \sin \theta) / L\} x + \gamma_s(1 - \delta_0)(\xi_s \cos \theta + \sin \theta) \dots\dots\dots(5)$$

したがって(5)式を x について0から x まで積分して整理すると次式を得る.

$$\frac{P_x - P_0}{P_0} = \frac{u_i^2 \gamma_s (\xi_s \cos \theta + \sin \theta)}{4g\xi_s \sigma P_0 F_{rt}^2} \left[(\delta_L - \delta_0) \frac{x}{L} + \left\{ (1 - \delta_0) - \frac{\delta_L - \delta_0}{4\xi_s \sigma L / D} \right\} \left\{ e^{4\xi_s \sigma x / D} - 1 \right\} \right] \dots\dots\dots(6)$$

ここで

$$F_{rt} = u_i / \sqrt{gD} \dots\dots\dots(7)$$

である。(6)式から閉そく層中の圧力の変化状態を知ることができる.

したがって閉そく層を吹抜くために必要な上流側の圧力 P_L は(7)式において $x=L$ とおくことによって次式から求めることができる.

$$\frac{P_L - P_0}{P_0} = \frac{u_i^2 \gamma_s (\xi_s \cos \theta + \sin \theta)}{4g\xi_s \sigma P_0 F_{rt}^2} \left[(\delta_L - \delta_0) + \left\{ (1 - \delta_0) - \frac{\delta_L - \delta_0}{4\xi_s \sigma L / D} \right\} \left\{ e^{4\xi_s \sigma L / D} - 1 \right\} \right] \dots\dots\dots(8)$$

3.3 閉そく層を流動化して吹抜くために必要な空気の圧力と量 閉そく層の上流側から働く圧縮空気が粒子の間げきを通して流れ, そのために閉そく層が流動化されて吹抜かれる場合について考える.

閉そく層の下流側の端から上流方向に測った距離 x の点における空気の速度を u_{ax} とし, 微小区間 dx についての圧力降下 dp は

$$dp = \{18\mu u_{ax} / (\psi_s d_s)^2\} \{(1 - \delta_x)^2 / \delta_x^3\} dL \dots\dots\dots(9)$$

で与えられる⁽⁹⁾とすると, 長さ x の間の圧力降下 Δp_x は

$$\Delta p_x = \int_0^x (dp/dL) dL = \int_0^x \{18\mu u_{ax} / (\psi_s d_s)^2\} \{(1 - \delta_x)^2 / \delta_x^3\} dL \dots\dots\dots(10)$$

で与えられる.

ここで閉そく層中の空げき率は前項の場合と同様に直線的に変化し(3)式で与えられ, 粒子間を通過する空気は等温変化すると考えると, x の点の見掛けの空気速度 u_{ax} は

$$u_{ax} = u_{a0} P_0 / P_x \dots\dots\dots(11)$$

で与えられる. ここで u_{a0} は閉そく層下流端における空気速度である.

(3), (11)式を(10)式に代入し, 空気の粘性係数 μ , 粒子の形状係数 ψ_s および平均直径 d_s を一定とみなして積分を行ない整理すると次式を得る.

$$\begin{aligned} \frac{P_x - P_0}{P_0} = & \left[1 + \frac{18\mu u_{a0} u_i^2}{g(\psi_s d_s)^2 (\delta_L - \delta_0) F_{rt}^2 P_0} \frac{L}{D} \left[\frac{(\delta_L - \delta_0)(x/L)}{\delta_0 \{\delta_0 + (\delta_L - \delta_0)(x/L)\}} \right. \right. \\ & \times \left. \left. \left\{ \frac{1}{\delta_0} - 4 - \frac{1}{\delta_0 + (\delta_L - \delta_0)(x/L)} \right\} + 2 \log \left\{ 1 + \frac{(\delta_L - \delta_0)x}{\delta_0 L} \right\} \right] \right]^{1/2} - 1 \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

閉そく層を吹抜くために必要な空気の圧力 P_L は(12)式において $x=L$, $P_x=P_L$ とおくことによって次式から求めることができる.

$$\frac{P_L - P_0}{P_0} = \left[1 + \frac{18\mu u_{a0} u_i^2}{g(\psi_s d_s)^2 F_{rt}^2 P_0} \frac{L}{D} \left\{ \frac{1}{\delta_L \delta_0} \left(\frac{1}{\delta_0} - 4 + \frac{1}{\delta_L} \right) + \frac{2 \log(\delta_L / \delta_0)}{(\delta_L - \delta_0)} \right\} \right]^{1/2} - 1 \dots\dots\dots(13)$$

閉そく層が流動化されて, 下流側から粒子が吹流される場合に対しては, (12)および(13)式において(1)式を用い

$$u_{a0} = u_i (\xi_s \cos \theta + \sin \theta)^{1/2} \dots\dots\dots(14)$$

とおけばよい.

空気源機械の吐出し空気圧力 P_L または吸引空気圧力 P_0 が与えられた場合, この圧力によって吹抜くことができる閉そく層の最大長さ L と管の内径 D との比 L/D は(13)式から次式によって与えられる.

$$\frac{L}{D} = \frac{g(\psi_s d_s)^2 F_{rt}^2 \{(P_L / P_0)^2 - 1\} P_0}{18\mu u_i^3 (\xi_s \cos \theta + \sin \theta)^{1/2} [\{ (1/\delta_0) - 4 + (1/\delta_L) \} / (\delta_L \delta_0) + \{ 2 \log(\delta_L / \delta_0) \} / (\delta_L - \delta_0)]} \dots\dots\dots(15)$$

ただし

$$F_{rt} = u_i / \sqrt{gD} \dots\dots\dots(16)$$

である.

4. 実 験

4.1 閉そく限界を求める実験装置および実験方法

さきに第 3 報第 5 図に示した実験装置の水平輸送管を順次 1B, $1\frac{1}{2}$ B, 2B および $2\frac{1}{2}$ B にとりかえ, 小麦, 大豆およびアルミナをいろいろな混合比で輸送して, それらの輸送可能な限界の空気速度を求めた. この場合, 供給口から 10m のところに, 長さがいずれも 1m で内径が各輸送管の内径と同じのガラス管を接続して流動状態を観察し, 輸送物の一部分が停滞しはじめるとき, 全部が停止するときの空気速度を測定した. なおアルミナについては粒子が微細なために全部が停止する限界をめいりょうに判別することがむずかしいので, 一部分が停止しはじめるときの空気速度だけを測定した.

また水平から上向きに流れの方向が変るベンドについても同様に実験を行なった.

4.2 ブロータンク式供給についての実験装置および実験方法

ブロータンク式供給器から供給される粉体の閉そく限界とこれに影響をおよぼす諸因子との関係は, 現象が複雑なために理論的に求めることがむずかしいので, 本研究では実験的に調べることとした. 実験に用いた供給器の構造は第 3 図の通りで, タンクの大きさは $Q_t=0.108\text{ m}^3$ である.

実験は次の順序で行なった. あらかじめ重量を測っておいたセメントあるいはアルミナをじょうごを用いてタンク内に静かに充てんした後, ふた a を密閉する. 次に工場作業用圧縮空気の一部を弁 b を開いて導入し, 底弁 c からタンク内に噴出させる. この場合, 空気の一部は側管 e に導き, f から噴出させて粉体のかくはんを助長する. 噴出する空気量は JIS 標準オリフィス g および h によって測定した.

タンク内に空気が噴出すると粉体は流動化され, 空気とともに円すい口 i から供給口 j に供給される. j は第 1 報第 5 図に示した全長 100m の 1B 水平輸送管に接続してある. 供給中のタンク内の圧力は圧力計 k によって知ることができるが, 供給口 j に設けた圧力測定口に自記圧力計を接続して圧力の変化状態を記録し, その線図から粉体が閉そくしたことを知った. 実験にあたっては, 粉体の充てん率を毎

回 0.85 とし, 使用空気量および輸送管の長さを変えて実験を繰返し, 粉体が閉そくする場合の条件を知ることとした.

なお実物の供給器についての経験と, 本実験にさきだて行なった数十回の予備実験とから, 第 3 図に示した円すい口 i の形状と, 側管 e と底弁 c から噴出する空気量の比は閉そくの限界条件にはたいした影響を与えないことが結論された. そのために今回の実験では, 円すい口の口径は 100 mm, e と c から噴出する空気量の比は毎回 1:2 の一定条件とした.

4.3 閉そく層の吹抜けに関する実験装置および実験方法

ロータリ式供給器の直後に長さがいずれも 1m の 1B あるいは 2B の短管, または 1 本の長さが 2.5m の 2B 管を 1 本あるいは 2 本接続した装置によって, 小麦, アルミナおよび白土を用いて実験を行なった. 第 4 図は 2.5m の 2B 管を 2 本接続した状態を示す.

長さ 1m の管の場合は出口から逆に人手によって粉粒体を押込んで詰め, 長さ 2.5m および 5m の場合は, まず下流端出口に目の細かい金網を張り, ロータ

第 3 図 実験に用いたブロータンク式供給器

第 4 図 閉そく層の吹抜け実験装置

リ式供給器から供給した粉粒体を空気によって送込んで詰めた。次に金網をとり除き、空気を徐々に供給して閉そく層を吹抜く瞬間の 500 mm おきの各点における圧力を測定した。

4.4 実験に用いた粉粒体 実験には第1報の研究に用いたと同じ小麦、大豆、セメント、アルミナおよび白土を用いた。それらの粉粒体の物理的性質は第1報第1表に示したとおりである。

5. 実験結果

5.1 閉そくの限界空気速度 水平管中に粉粒体を輸送して空気速度を減少させていくと、いずれの粉粒

(a) 水平管に小麦および大豆を輸送した場合

(b) 鉛直パイプに小麦および大豆を輸送した場合

(c) 水平管にアルミナを輸送した場合

第5図 混合比 μ_s と流動停止の限界空気速度 u_a (m/s) との関係

体の場合でも粒子の運動速度がしだいに低下して不均一な流れとなり、不規則な脈動を生じ、ついに管底に停滞しはじめる。この場合、管底に近い粒子は管壁上をしゅう動と停止を繰返しながら流れるが、上層部すなわち管の中心部に近い粒子は下層部にある粒子より早い速度で流れる。さらに空気速度を小さくすると上層部にある粒子も停滞して輸送は全く停止するが、流動がやむ瞬間に粒子が集積して管の全横断面に充満して管を閉そくすることが多い。

水平から上向きに流れの方向が変るベンドの直前にもガラス管を取付けて実験を行なったが、同様な現象が観察された。

空気速度によって流動状態が変る状態は第3報第6～8図に示した瞬間写真によって知ることができる。

横軸に混合比 μ_s をとり、縦軸に空気速度 u_a (m/s) をとって、それぞれの粉粒体について、粒子群の一部が停滞しはじめるとき、全部が停止するときの実験値を図に描くと第5図のとおりになる。図中の点線は(1)式から計算した値を示している。

図からわかるとおり、いずれの場合も混合比が大きいほど、またベンドの直前では水平管の場合よりも限界となる空気速度が大きい傾向がある。しかしその変化はわずかであって、それぞれの粉粒体についてほぼ一定とみなしてさしつかえない。

5.2 ブロータンク式供給器からの供給と閉そく

セメントおよびアルミナを用い、充てん率を毎回 $\omega = 0.85$ とし、使用空気量を $Q_a = 0.45 \sim 2.03$ m³/min、輸送管の長さを $L = 1.5 \sim 75$ m に変えて実験を行なった。横軸に使用空気量 Q_{a0} (m³/min) とタンク容積 Q_t (m³) との比 $n_0 = Q_{a0}/Q_t$ (1/min) をとり、縦軸に混合比 μ_s をとって実験結果を図に描くと第6図のとおりになる。

流動状態は輸送管の一部分に取付けた透明なガラス

第6図 $n_0 = Q_{a0}/Q_t$ (1/min) と混合比 μ_s および流動状態の関係

管を通して観察した。 n_0 の値が小さいほど、また輸送管が長いほど、すなわち使用空気量が少なく供給口に加わる背圧が大きいほど流動状態は不均一になり、それぞれの流れ方をする n_0 の値の範囲は第 6 図に記入したとおりである。

5.3 閉そく層の吹抜け 第 4 図に示した装置を用いて実験を行なったが、横軸に粉粒体を詰めた区間の長さ L と管の内径 D との比 L/D をとり、縦軸にその粉粒体を吹抜く瞬間の閉そく層両端の圧力差 $(P_L - P_0)$ と下流側の端における絶対圧力 P_0 との比 $(P_L - P_0)/P_0$ をとって、小麦、アルミナおよび白土についての実験結果を図に描くと第 7 図のとおりになる。

また横軸に下流側の端から閉そく層中の任意の点までの距離 x と閉そく層の全長 L との比 x/L をとり、縦軸にその間の圧力差 $(P_x - P_0)$ と全体の圧力差 $(P_L - P_0)$ との比 $(P_x - P_0)/(P_L - P_0)$ をとって測定値を図に描くと第 8 図のとおりになり、閉そく層中の空気圧力の変化状態がわかる。

(a) 小麦の場合

(b) アルミナおよび白土の場合

第 7 図 閉そく層の L/D と吹抜くために必要な空気の圧力差の程度 $(P_L - P_0)/P_0$ との関係

第 7 図および第 8 図に描いてある曲線は (6), (8) 式および (12), (13) 式から計算した値を示しているが、これらについては (19) 式で検討する。

6. 検 討

6.1 輸送管中の閉そくの限界条件 小麦、大豆およびアルミナについて (1) 式から計算した水平管に対する流動限界の空気速度と第 5 図に示した実験結果を比較すると第 1 表のとおりになる。

第 1 表に示した結果をみると、小麦および大豆では (1) 式による計算値と粒子群の一部が停止しはじめるときの実験値とはほぼ一致している。アルミナについては前述のとおり一部分が停止しはじめるときの空気速度だけを測定したが、全部の粒子が停止するとき、すなわち閉そくを生ずるときの空気速度は約 0.1 m/s で、(1) 式による計算値とほぼ一致していることがわかった。

なお大豆が全部停止するときの空気速度は 2.80 m/s で意外に小さい。これは大豆粒子が球形に近いのでころがりやすく、小さい空気速度でもころがり輸送されるためである。

装置の計画にあたっては輸送空気速度を適切に選ぶ必要があるが、粒体については (1) 式による計算値以上の空気速度にとれば閉そくすることはない。しかし粉体については一部分でも停止しはじめると多分に閉そくの危険があるので注意を要する。

6.2 プロータンク式供給器の閉そく限界 第 6 図からわかるとおり、供給器から供給される粉体の混合

第 1 表 流動限界の空気速度

項目	u_a m/s			比		
	(1)式 I 計算値	実 験 値		II/I	III/I	III/II
		II 一部停止	III 全部停止			
小麦	7.85	7.75	5.30	0.987	0.675	0.684
大豆	11.05	11.00	2.80	0.995	0.253	0.254
アルミナ	0.11	5.10	—	45.5	—	—

第 8 図 閉そく層中の空気圧力の変化状態

比 μ_s は n_0 および L/D の値が小さいほど大きくなる。これはタンク内の流動化された状態の粉体の濃度が大きいほど、また出口における抵抗が小さいほど能率よく供給されることを表わして、物理的にもうなずかれる。測定値からこれらの関係を求めると次式を得る。

$$\mu_s = 12.8 + 992 n_0^{-1.12} (1 - 2.23 n_0^{-0.230}) \times \{\log_{10}(L/D) - 0.696\} \dots\dots\dots (17)$$

所要動力の軽減を計るためには、 n_0 の値をできるだけ小さくするように計画すべきであるが、ある値より小さいと閉そくを生ずる。その限界となる値と混合比との関係は第6図に示したとおりで

$$\mu_s = 220.3 - 31.8 n_0 \dots\dots\dots (18)$$

で表わされる。

また横軸に L/D をとり、縦軸に閉そくする限界の n_0 の値をとって、第6図に示した実験結果を描きなおすと第9図のとおりになり、両者の間には

$$n_0 = 4.25 + (0.95 \times 10^{-3} L/D) \dots\dots\dots (19)$$

の関係がある。

したがってブロータンク式供給器の計画にあたっては、与えられた L/D の値に対して n_0 の値を(19)式が与える値以上、すなわち第9図に示す流動領域でしかなるべく小さい値をとるように使用空気量とタンクの大きさを決めなければならない。なおブロータンク式供給器が与えられている場合は、(19)式で規定される値よりも小さい n_0 の値の状態で運転されると粉体は供給口で閉そくすることになるため注意を要する*。

6.3 閉そく層を吹抜くための条件 5.3 に示した結果とガラス管を用いて同様に行なった実験の観察結果から、粒体の場合は閉そく層の上流側に働く空気の

第9図 ブロータンク式供給器の輸送管の L/D の値と供給口で閉そくを生ずる限界の $n_0 = Q_{a0}/Q_i$ 1/min の値との関係

* 本文で述べた実験の他に、タンクの大きさおよび充てん率をいろいろに変えて供給能力の変化する状態も調べた。その結果、充てん率が大きいほど混合比が大きくなること、輸送管の長さや充てん率が一定の場合は、タンクの容積を変えても n_0 の値が同じであれば同じ混合比の供給が可能であることがわかった。

圧力がある値に達すると一時に吹抜かれるが、粉体の場合は閉そく層が徐々にくずれ、それがある程度進むと一時に吹抜かれることがわかった。

これは管壁との摩擦係数が第1報第1表に示したとおり小麦では 0.392, 大豆では 0.460 で比較的小さくすべりやすいので容易に吹抜かれるのに対し、アルミナでは 0.528, 白土では 0.507 でともにすべりにくいことと、粉体層はわずかの空気でも通過すると流動化されるためと考えられる。すなわち閉そくした粉体層は一般にち密で空気が通過しにくいのであるが、粒子間を通るわずかの空気によって流動化され摩擦力を減ずるために、上流側に働く空気の圧力と粒子間を通る空気の流れによってついに吹抜かれるものと考えられる。

第7図(a)に示した曲線は閉そく層の上流側の端における空げき率を $\delta L = 0.260$, すなわち球形の粒子が最も密に詰ったとし、係数 σ を 0~0.008 に変えて小麦に対して(8)式を計算した結果を描いたものであるが、実験値は $\sigma = 0.002$ の場合の計算値とほぼ一致している。また同じく(2)の曲線は(12)式をアルミナおよび白土について δL を 0.260~0.600 に変えて計算した結果を示しているが、粉体については $\delta L = 0.260$ の場合の計算値とほぼ一致している。

上流側の端における空げき率 δL と係数 σ の値は粒子の詰りぐあいによって異なるのであるが、閉そく層を吹抜くために必要な空気の圧力差 $P_L - P_0$ は第7図に示した結果から、粒体に対しては $\delta L = 0.260$, $\sigma = 0.002$ とおき(8)式から、粉体に対しては $\delta L = 0.260$ とおき(13)式から計算により求めることができることがわかる。

この結果はまた、閉そくのおそれのある場所にあらかじめ空気の吹込み管を設けておく場合、あるいは吸引式輸送の場合は空気の吸込口を設けておく場合に対しても応用することができ、それらの間隔と準備すべき空気の圧力との関係を知ることができる**。

7. 結 論

本研究では、まず粉粒体粒子の運動方程式を応用して、輸送管中で粒子が停止するときの空気速度、すなわち輸送に必要な最小の空気速度を与える式を導き、実験によってその式の当否を確かめた。その結果、粒

** 第7図が示す値は実際の装置についての経験値とほぼ一致している。実際の装置では粉粒体の供給口、ベンダや切替弁の直前、あるいは管のとりはずしが不可能な場所、たとえば他の機器との接続部や建築物に固定する箇所に弁付の側管を設け、平常は弁を閉じておき、万一閉そくした場合は下流側にある弁から順次開いて、圧送式の場合は圧縮空気を吹込み、吸引式の場合は大気を吸引して閉そく層を吹抜いている。

体については式が与える値と実験値とはほぼ一致し、粉体については混合比がきわめて小さい状態に対しては実験値と一致するが、混合比が大きい輸送の場合は計算値の約 40 倍の空気速度が必要であることがわかった。

またブロータンク供給器について、その供給能力と出口における閉そくの条件を実験的に調べ、閉そくの限界条件は供給口に加わる背圧の大きさと、使用空気量とタンク容積との比に関係していることを明らかにし、閉そくを避けるために必要な条件と要求される供給能力を得るために必要な仕様を決める上の基準を得た。

次に粉粒体が閉そくした場合、それを吹抜くために必要な空気の圧力について二とおりの式を導き、計算値と実験値とを比較して、各式はそれぞれ粒体および

粉体に適用できることを確かめた。それらの式によって、装置が持つ空気の圧力だけで吹抜くことができる閉そく層の長さを知ることができ、また閉そくのおそれがある場所にあらかじめ空気の吹込口、あるいは吸込口を設けておく場合は、口の間隔と準備すべき空気の圧力との関係を決めることができる。

文 献

- (1) 植松・狩野, 本論文集 171 ページ.
- (2) W. Barth, *Chemie Ing.-Techn.*, **26-1** (1954-1), 33.
- (3) R.C. Patterson, *Trans. ASME, Ser. A*, **81-1** (1959-1), 43.
- (4) F.A. Zenz & D.F. Othmer, *Fluidization and Fluid Particle System*, (1960), Reinhold.
- (5) 池森, 機械学会誌, **64-507** (昭 36-4), 531.
- (6) 菅原・吉川・大泉, 機械学会論文集, **27-177** (昭 36-5), 638.
- (7) 白井, 流動層, (昭 33), 42, 科学技術社.
- (8) 植松・狩野, 機械学会論文集, **27-183** (昭 36-11), 1748.
- (9) Kozony, *Ber. Wien Akad.*, **1369-271** (1927).

621. 67-253:533. 691. 01

うず巻ポンプ羽根車の流れに関する研究*

(第 7 報, 流れ面の決定法)

村 田 暹**

Research on the Flow in a Centrifugal Pump Impeller

(7th Report, On the Axisymmetric Flow in a Mixed-Flow Impeller)

by SUSUMU MURATA

To design a mixed-flow impeller, the impeller must be divided into partial runners by flow surfaces, which are determined usually without considering the action of blades. In this report the following two methods established by the author to determine the flow surface are described. These methods are more reasonable, because proper considerations have been given to the action of blades.

(1) In the 1st method, the author has solved numerically the fundamental partial-differential equations for the flow in the interior, in front, and in the rear of the impeller respectively, which have been derived from the equations given by Lorenz and Bauersfeld.

(2) In the 2nd method which is an approximate method, the author has solved graphically the fundamental equation for the flow in the interior of impeller by transforming the coordinates.

An example is shown comparing the 1st and 2nd methods with the usual one.

1. 緒 言

混流羽根車の設計にあたっては、羽根車をいくつかの回転面で切って部分羽根車にわけ、この回転面上を流体が流れるとして設計を行なうのがふつうである。

この回転面を流れ面とよぶことにする。

羽根数が有限な場合には、羽根車前方で回転面上にあった流体は羽根車後方で、羽根数に相当して波うつ面上を流れると思われる。しかし羽根数が多い場合には、軸流の場合⁽¹⁾から推定して回転面で近似できると思われる。

従来流れ面の決定には次のような方法がとられてい

* 昭和 36 年 4 月 5 日 第 38 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 36 年 8 月 2 日。

** 正員、山梨大学工学部 (甲府市元柳町)。