切りくずの管内空気輸送*

—鉛直管空気輸送における基本特性—

湊 喜代士** 豊島 敏雄**

Pneumatic Chip Conveying
—Fundamental Characteristics of
Vertical Conveyance—

Kiyoshi MINATO and Toshio TESHIMA

In order to obtain the information concerning the fundamental nature of pneumatic transport of chips in a vertical tube, pressure drops are measured for various air velocities, shapes or sizes of chips and the weight ratios (m) of the air and chips transported. The obtained results are summarized as follows: The air velocity at minimum pressure drop is low for the chip which has the small value

of the minimum pressure drop and also the large projected area per unit weight. The ratio (α) of pressure drop for the case in which the air is conveying chips to that for the case in which the air is flowing without chips increases as the air velocity decreases. The ratio (α) also increases with increasing of the weight ratio (m), and the relation between α and m is approximately expressed by

$$\alpha = 1 + K \cdot m$$

where K is constant.

Key words: pneumatic conveying, chip conveying, chip excluding, pressure drop, vertical conduit.

1. ま え が き

切削加工によって生成された切りくずをいかに具合よく、速やかに取り除き搬送するかが現在切削機械工場における重要な問題である。加工物から分離した切りくずを加工域より工場外などへ連続的に取り除き搬送する一対策として円管を用いて空気輸送することが考えられる。

ところで小麦、大豆のような比較的形状、大きさの定まった固体粒子（粒体）の空気輸送に関しては従来より研究が行われている^{1)~4)}。しかし切りくずのように形状、大きさが不規則、雑多なものについてはまだ研究が行われていない。したがって、それらの原則を考慮に入れて切りくずを管内空気輸送する場合について検討することにした。

空気輸送において、輸送管内の圧力損失の値を的確に算定することは、空気源となる機械の種類と容量を決定し、運転維持費を見積もるうえで必要かつ重要である⁵⁾⁶⁾。そこで本研究においては、切りくずを鉛直管空気輸送する場合の有用な基礎的特性を明確にすることを目的として、主に切りくずとそれを輸送する空気の重量比すなわち混合比と圧力損失との関係を調べた。具体的

には、切りくず輸送における空気速度と圧力損失の関係、切りくずを輸送するときの圧力損失とそのときの空気速度で空気だけを流したときの圧力損失の比すなわち圧損比と混合比の関係、切りくずの大きさ、形状で決まる切りくず受圧面積と圧力損失が最小になる空気速度すなわち最小圧損空気速度の関係などについて検討した。

2. 切りくず輸送管の圧力損失

切りくずを鉛直管空気輸送するとき輸送管内で空気および切りくずが消費する各種の損失エネルギーは、すべて空気の圧力エネルギーによって補給される⁵⁾⁶⁾。輸送途中の大部分においては空気はすでに一定速度に加速されており、切りくずは等速運動をしていると考えられる。したがって、切りくずの等速部分の全圧力損失 ΔP_F は、まず空気の流れについては管壁との摩擦損失 ΔP_{af} が考えられ、また切りくずの流れについては管壁との摩擦、衝突による損失 ΔP_{sf} および切りくずが浮遊、上昇するために費やされる損失 ΔP_{sw} が考えられる⁶⁾。すなわち全圧力損失 ΔP_F は

$$\Delta P_F = \Delta P_{af} + (\Delta P_{sf} + \Delta P_{sw}) \quad (1)$$

で示される。

空気の管壁との摩擦損失 ΔP_{af} は

$$\Delta P_{af} = \lambda_a \frac{L}{D} \frac{\gamma_a U_a^2}{2g} \quad (\text{kg/m}^2) \quad (2)$$

と表すことができる⁷⁾。ここに、 λ_a は空気だけを流したときの管摩擦係数、 L, D は鉛直輸送管の長さおよび内

* 原稿受付 昭和55年4月14日。昭和53年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和53年10月15日）および昭和55年度精機学会春季大会学術講演会（昭和55年3月30日）にて発表。

** 正会員 福井大学工学部（福井市文京3-9-1）

径 (m), γ_a は空気の比重量 (kg/m^3), g は重力の加速度 (m/s^2), U_a は輸送管内の平均空気流速 (m/s) である。

次に, 切りくずの流れに対する管壁との摩擦, 衝突による損失 ΔP_{sf} は ΔP_{af} の場合と同様にして求めると

$$\Delta P_{sf} = \lambda_m \frac{L}{D} \frac{\gamma_m U_s^2}{2g} \quad (\text{kg/m}^2) \quad (3)$$

となり, λ_m は切りくずの浮遊, 上昇中における管壁との管摩擦係数, γ_m は切りくずの浮遊, 上昇状態における比重量 (kg/m^3), U_s は管内の切りくず輸送速度 (m/s) である。また, 切りくずの鉛直管輸送では切りくずを浮遊させるエネルギーのほかに所定高さ (鉛直上昇高さ) まで上昇させるに必要なエネルギー, すなわち位置のエネルギーが必要である。鉛直管の長さ L 中に含まれる切りくず重量は $(W_s \cdot L)/U_s$ (W_s は単位時間に輸送される切りくず重量, kg/s) であり, これが浮遊速度 U_t (m/s) で落下する際の切りくずエネルギー $(W_s \cdot L \cdot U_t)/U_s$ ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$) を補充すれば切りくず群は現在位置 (高さ) を保つことができると考えて, これを浮遊エネルギーとみなす。これを単位体積当たりの空気のエネルギーすなわち圧力損失の形で示すと, 浮遊に必要なエネルギー ΔP_{sv} は

$$\Delta P_{sv} = \frac{1}{Q_a} \frac{W_s \cdot L \cdot U_t}{U_s} \quad (\text{kg/m}^2) \quad (4)$$

ここに Q_a は空気流量 (m^3/s) である。続いて, 切りくずの上昇のための位置エネルギーは $W_s \cdot L$ ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$) であり, これを単位体積当たりの空気のエネルギーすなわち圧力損失の形で示すと, 上昇に必要なエネルギー ΔP_{sl} は

$$\Delta P_{sl} = W_s \cdot L / Q_a \quad (\text{kg/m}^2) \quad (5)$$

したがって, 切りくずを鉛直管で上昇させるための全エネルギーを圧力損失の形で表し, ΔP_{sw} とすると

$$\Delta P_{sw} = \Delta P_{sv} + \Delta P_{sl} = \frac{W_s \cdot L}{Q_a} \left(\frac{U_t}{U_s} + 1 \right) \quad (6)$$

で表される。この式 (6) は, 切りくず輸送における速度比 U_s/U_a を φ , 混合比 W_s/W_a を m , W_a/Q_a を γ_a と置くと

$$\Delta P_{sw} = \frac{m \cdot \gamma_a \cdot L}{\varphi \cdot U_a} (U_t + U_s) \quad (7)$$

と書き換えられる。

さらに式 (1) に式 (2), (3), (7) を代入して整理すると

$$\begin{aligned} \Delta P_F = & \frac{\gamma_a \cdot U_a^2 \cdot L}{2gD} (\lambda_a + m\varphi\lambda_m) \\ & + \frac{m \cdot \gamma_a \cdot L}{\varphi \cdot U_a} (U_t + U_s) \end{aligned} \quad (8)$$

のように表される。これが切りくず輸送管の全圧力損

図1 鉛直管空気輸送における U_a と ΔP の関係

失, すなわち全消費エネルギーを示す。この第1項は空気速度エネルギーに比例し, 第2項は空気速度に逆比例することを示している。

いま式 (8) の $\lambda_a, \lambda_m, \varphi$ などの各係数を一定とし, m の一定値に対して U_a と ΔP_F の関係を図示すると, 図1のように表される。すなわち, O-X は式 (8) の第1項を表し, 空気および切りくずの摩擦, 衝突による損失の和で, U_a^2 に比例して圧力損失は増加する。また Y-Y は第2項を表し, 切りくずの浮遊, 上昇による損失で, U_a に逆比例して圧力損失は減少する。O-X, Y-Y の合成が Z-Z となり, 空気速度の小さい場合 (図の $U_a < U_{a,min}$) には, 浮遊, 上昇による損失が大きく影響して全圧力損失は比較的大きい。また空気速度が次第に増すと ($U_a < U_{a,min}$), 摩擦, 衝突による損失が大きく影響し, 全圧力損失はほぼ U_a^2 に比例して増加する。したがって, ある空気速度 (図の $U_{a,min}$) において全圧力損失の最小値, すなわち最適輸送空気速度の存在することが察知できる。

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概要を図2に示す。切りくずはプロア①によって輸送管 (吸込管: アクリル管, 内径 80.4 mm, 肉厚 4.6 mm) ②に吸い込まれてプロア内に収納される。空気はプロア上端より空気速度 (空気流量) 測定のため吐出管 (塩化ビニル管, 内径 78.3 mm, 肉厚 5.5 mm) ③を通り外に吐き出される。切りくずは切りくず送り台車⑥の金網上に並べられ, 台車の移動とともに輸送管内に吸い込まれ送られる。送り台車の移動速度は無段変速モータ⑤の軸に巻きつけた糸で引張られ, レール⑦上を移動する。輸送管は圧力損失測定のための静圧取出し穴をもち, 圧力損失はベッツ型マノメータ⑩で測定する。また空気速度は空気流量調節弁④で設定し, 流量測定部⑨の動圧を U 字管マノメータ⑩で測定して求める。吐出管入口部 (流量測定部までの距離は約 20d

1: プロア, 2: 輸送管(吹込管), 3: 吐出管, 4: 空気流量調節弁, 5: 十字形整流板, 6: 切りくず送り台車, 7: レール, 8: 無段変速モーター, 9: 空気流量測定部, 10: 傾斜マンノメータ, 11: ペッツ型マンノメータ, 12: アルコール温度計

図2 鉛直管空気輸送の実験装置概要図

図3 実験に使用した切りくずの形状, 大きさおよび番号

である。 d は管内径)には長さ $2d$ の十字形整流板⑤を設け, また吐出管下流に吐出空気温度を測るためのアルコール温度計⑫を設置した。

切りくずの輸送量(吸込み量)および輸送切りくずの混合比の設定は次の方法による。すなわち車の上面の金網上に散布する切りくずの重量と車の移動速度および輸送管内の空気速度によって調節する。

本実験では, 種々の旋削条件で作った鋼の切りくずを使用した, その切りくずの番号および形状を図3に示す。

図4 混合比の変化による空気速度と圧力損失の関係(1)

図5 混合比の変化による空気速度と圧力損失の関係(2)

4. 実験結果および考察

4.1 鉛直輸送管内の空気速度と圧力損失

切りくずを管内空気輸送するときの空気速度と圧力損失の両者の関係を種々の輸送切りくずの混合比を変えた場合について調べた。その代表例として図4に切りくずNo.6, 図5に切りくずNo.7の場合を示す。同一混合比の場合, 空気速度を0から次第に増加させて, 切りくずが輸送され始める時点では比較的大きい圧力損失を示す。続いて空気速度の増加とともに圧力損失は減少し,

図中の No. あるいは数字は切りくず番号を示す。
他の図においても同じ

図6 各種切りくず、混合比の変化による最小圧損空気速度と最小圧力損失の関係

空気速度のある値において最小圧力損失 $\Delta P_{\min}$ を示す。このときの空気速度が最小圧損空気速度 $U_{a,\min}$ であり、 m 一定の輸送条件における最適空気速度である。さらに空気速度を増すと逆に圧力損失は増加する。この傾向はすべての切りくずのすべての混合比において同じである。切りくずが輸送されはじめる小さい空気速度において比較的圧力損失の大きいのは、前述(2節)のようにこの範囲の空気速度の場合には切りくずを浮遊、上昇させるに要するエネルギーに多く費やされるためである。また空気速度が増すと切りくずの摩擦、衝突による損失が増し、浮遊、上昇による損失が減少し、前者の影響をより多く受けることに起因して、全圧力損失は増加する。全般的に式(8)の示す傾向(図1のZ-Z曲線)と一致する。

同じ切りくずを同一の空気速度で輸送するとき、混合比が大きいほど圧力損失が増大している。混合比が大きくなると輸送管内の単位体積当たりの切りくず量が増加し、管壁との摩擦、衝突が増すことなどによる圧力損失が増加することは容易に考えられる。

図4、図5より、切りくずの種類が異なれば、あるいは同一切りくずでも混合比が変われば最小圧損空気速度 $U_{a,\min}$ は変わることがわかる。この $U_{a,\min}$ と $\Delta P_{\min}$ の関係を各種切りくずについてまとめて示したものが図6である。図では複雑なため、混合比 $m=1.0, 0.6, 0.2$ の場合について示した。 $\Delta P_{\min}$ が大きい切りくずほど $U_{a,\min}$ の値も大きいことを示している。また各切りくず

図7 切りくずの受圧面積と最小圧損空気速度の関係

における両者間には比例関係が存在することもわかる。また各切りくずの縦軸と横軸の値の積、すなわち $\Delta P_{\min} \cdot U_{a,\min}$ は直接それぞれの切りくずの輸送に必要な最小エネルギーに比例している。したがって、この図によって各種切りくず相互間における切りくず輸送に要する最小必要な動力の比較の目安を立てることができる。

また、いずれの切りくずにおいても、混合比が増すにつれて破線で示すように最小圧損空気速度はいくぶん高速側に順次移行している。これも複雑なため破線で示すのは切りくず No. 7, No. 8, No. 5, No. 6 の4種にとどめたが、これらの破線はほぼ平行である。すなわち、切りくずが違っても高速側へずれる状態は同じ傾向を示している。これは混合比が大きくなるほど切りくずを浮遊、上昇に消費するエネルギーが増加し、それに見合った空気速度が必要になるためと考える。

4.2 切りくずの受圧面積*と最小圧損空気速度

いま切りくずの受圧面積 S と図6の最小圧損空気速度 $U_{a,\min}$ との関係を求めたものを図7に示す。最小圧損空気速度は一般的に切りくず受圧面積の大きい切りくずほど小さいことがわかる。これは、同じ条件で切りくずを空気輸送する場合には受圧面積の大きい切りくずほど小さい動力で輸送を行うことができることを意味している。この両者の間には概略的ではあるが、次の関係が認められる。

$$U_{a,\min} = C \cdot S^{-n} \quad (9)$$

ここで n, C は定数であり、

$$\text{混合比 } m=1.0 \text{ のとき } U_{a,\min} = 28.4S^{-0.21}$$

$$\text{混合比 } m=0.6 \text{ のとき } U_{a,\min} = 27.5S^{-0.21}$$

(図7の場合)

$$\text{混合比 } m=0.2 \text{ のとき } U_{a,\min} = 27.0S^{-0.22}$$

混合比が増大すると $U_{a,\min}$ の値はいずれの切りくず

* 切りくずの受圧面積 S (mm²/g): 流れに直角な面に対する投影面積をその切りくずの重さで除した値⁹⁾。

図8 空気速度の変化による混合比と圧損比の関係

についても一樣に増大するが、いずれの混合比の場合にも直線の傾きはほぼ似ている。すなわち混合比が変わっても最小圧損空気速度 $U_{a \cdot \min}$ と切りくず受圧面積 S の関係はほとんど変わらないことがわかる。

4.3 鉛直管空気輸送における混合比と圧損比

圧損比を α とすれば、前述より

$$\alpha = \Delta P_F / \Delta P_{af} \quad (10)$$

切りくずを種々の空気速度で鉛直管輸送したときの混合比 m と圧損比 α との関係を各切りくずについて調べた。その一例切りくず No.1 の場合を図8に示す。いずれの空気速度においても、圧損比は混合比の増大につれて比例して増加している。また同じ混合比の場合、空気速度が大きいほどその圧損比は小さいこともわかる。

α - m の関係はいずれの空気速度においてもおおむね $\alpha = 1.0$, $m = 0$ の点を通る直線とみなしうる。いま直線の傾き角を θ とするとき、両者の関係は

$$\alpha = 1 + m \cdot \tan \theta = 1 + m \cdot K \quad (11)$$

で近似することができる。空気速度 U_a が大きくなるほど K の値は減少し、したがって圧損比 α は小さくなる。式(11)の K は切りくずの形状・大きさ、すなわち切りくずの種類および切りくず輸送空気速度によって変わる。

次に各切りくずについて空気速度 U_a と式(11)の K の値の関係を調べると図9のようになる。 K は U_a が比較的小さい場合には大きい値を示すが、 U_a が増すにつれて次第に減少し、ある空気速度以上になるとその減少は緩慢になる。図では複雑なため切りくず No. 3, No. 6, No. 7, No. 12 の場合についてのみ示した。これら切りくずの U_a と K の関係を比較すると、 U_a の小さい範囲(こ

図9 切りくずの異なる場合における空気速度と係数 K の関係

図10 切りくずの異なる場合における空気速度と圧力損失の関係対比図

の場合は $0 \sim 13$ m/s 付近) では切りくずの種類によって K は大きい違いを示しているが、 U_a が大きくなると(この場合は 17 m/s 付近) K は切りくずの種類にはあまり関係なくなり、 K は 1 に近づくようになる。この傾向は、 ΔP と U_a の関係を切りくず No. 6, No. 7, No. 12 について比較した図10からも明らかで、 U_a が 17 m/s 付近を超えると、切りくずの種類にあまり関係なく ΔP はほぼ近似した値になっている。以上より、この切りくず空気輸送装置の場合には、使用空気速度が 17 m/s 程度を超えると切りくず形状、大きさによる圧力損失への影響の違いが少なくなり、すなわち切りくずの種類による影響を考慮する必要があまりなくなることを意味している。極言すれば、各種の切りくずを混合して鉛直管空気輸送する場合には、ある空気速度以上に大きくすれば個々の切りくずの形状、大きさなどについて検討する必要

はあまりなくなるものと考えられる。

いま、式(10)を式(1)、式(8)を用いて書きかえると、

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\Delta P_F}{\Delta P_{af}} \\ &= \frac{\Delta P_{af} + (\Delta P_{if} + \Delta P_{sw})}{\Delta P_{af}} \\ &= 1 + \frac{\Delta P_{if} + \Delta P_{sw}}{\Delta P_{af}} \\ &= 1 + \frac{m}{\lambda_a} \left[\lambda_m \varphi + \frac{2g \cdot D}{U_a^2} \left(\frac{U_t}{U_s} + 1 \right) \right] \quad (12)\end{aligned}$$

ここで、

$$K = \frac{1}{\lambda_a} \left[\lambda_m \varphi + \frac{2g \cdot D}{U_a^2} \left(\frac{U_t}{U_s} + 1 \right) \right] \quad (13)$$

とおけば、式(12)は $\alpha = 1 + K \cdot m$ となり、式(11)と一致する。式(12)、式(13)より圧損比 α は混合比 m により比例して変わることがわかる。また混合比 m を一定とした場合、定数 K のなかに含まれる空気速度 U_a によって変わり、圧損比 α は空気速度 U_a の上昇とともに減少する。すなわち上述のように実験結果は理論式とよく一致している。なお式(13)の K の中にも m によって変わる係数 λ_m 、 φ などが含まれるので、厳密には α は m の一次関数ではない。

5. ま と め

本研究で得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) 最小圧力損失 $\Delta P_{\min}$ が小さい切りくずほど、最小

圧損空気速度 $U_{a \cdot \min}$ も低い。また、切りくず混合比を増すと両者ともに増大する。

- (2) 受圧面積 S の大きい切りくずほど、最小圧損空気速度 $U_{a \cdot \min}$ は低い。また両者の間には概略的に

$$U_{a \cdot \min} = C \cdot S^{-n} \quad C, n \text{ は定数}$$

なる関係が認められる。

- (3) 圧損比 α は空気速度 U_a の減少につれて大になり、混合比 m の増大につれて比例して増加する。また α と m の関係は

$$\alpha = 1 + K \cdot m$$

で近似できる。 K は切りくずの種類、空気速度などにより異なるが、空気速度が増すにつれて1に近づく。

参 考 文 献

- 1) 上滝具貞：電気コンベアの実験的研究，日本機械学会誌，**53**，383 (1950) 495.
- 2) 池森亀鶴：粒体の空気輸送における圧力損失，日本機械学会誌，**62**，480 (1959) 89.
- 3) 植松時雄ほか：空気による粉粒体の輸送に関する研究，日本機械学会論文集，**28**，186 (1962) 164.
- 4) 森川敬信：混合比の大きい空気輸送の圧力損失，日本機械学会論文集，**33**，254 (1967) 1633.
- 5) 上滝具貞：粉粒体の空気輸送，日刊工業新聞社 (1974) 195.
- 6) 狩野 武：粉粒体輸送装置，日刊工業新聞社 (1975) 117.
- 7) 日本機械学会編：改訂第6版機械工学便覧，日本機械学会 (1977) 8-10.
- 8) 湊 喜代士，豊島敏雄：切りくず処理に関する研究（第3報），精密機械，**43**，7 (1977) 849.