切りくずの管内空気輸送*

—鉛直管空気輸送における輸送管径の影響および切りくずの挙動—

湊 喜代士** 豊島 敏雄**

Pneumatic Chip Conveying
—The Effects of Pipe Diameter upon Vertical
Conveying Characteristics and the
Kinetic Behaviors of Chips—

Kiyoshi MINATO and Toshio TESHIMA

The relationships between fundamental characteristics of vertical chip conveying and conditions of transportation were researched for various pipe diameters, chip sizes and shapes. And also, the kinetic behaviors of chips were observed by high speed photography. In case of constant air velocity, the pressure loss decreases with the increase of

pipe diameter, but the larger conveying power is required. When the air velocity becomes low, chip meander and have frequent occasions to collide to each other or to contact with the inner surface of a pipe and so the velocity ratio of chips to air becomes small. Generally the velocity ratios of chips with large projected area per unit mass are large, and those of upcurled chips are larger than those of sidecurled chips.

Key words: pneumatic conveying, chip conveying, vertical conveyance, pipe diameter, chip shape, velocity ratio, kinetic behavior

1. ま え が き

生成され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、大豆などの空気輸送に関しては従来より研究が行われているが、それを切りくずのように形状、大きさが不規則、雑多なものに単純には適用し難く、またその研究も少ない。そこで、切りくずを鉛直管を用いて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、前報¹⁾では空気速度と圧力損失の関係、圧損比と混合比の関係、最小圧損空気速度などについて報告した。今回は主として輸送管径の違いが輸送特性にいかに関与するかを調べ、また輸送管内の切りくずの挙動を写真撮影して速度比を求めるとともに、切りくずの挙動から輸送特性の考察を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概要は、前報¹⁾と同様である。ただし本研究では輸送管径の影響を調べるために、内径の異なる数種類の鉛直管を使用した。実験に使用した切りくずの形

状、大きさおよび切りくず番号は前報と同じである。長い連続形切りくずの空気輸送は困難であり、研究の対象としていない。図中 No. 11 および No. 16 の切りくずは切削時に自然に分断したもので、写真撮影のために手で折ったものではない。実験方法も前報と同様である。したがって説明を省略する。

本研究ではさらに輸送中の切りくずの挙動を明らかにするため、ストロボ照明による写真撮影を行った。一定時間ごとの切りくずの位置および姿勢を他の切りくずと区別して確認できるように、使用する切りくずの約 5% だけに蛍光塗料を噴きつけた。

3. 実験結果および考察

3.1 輸送管径と圧力損失

輸送管内径の異なる 6 種類 ($\phi 55.1, 61.9, 67.2, 70.0, 76.1, 80.1$) の鉛直管を用い、空気速度 u_a を 22 m/s 一定として切りくずを輸送するときの、管径と圧力損失 ΔP の関係を求め、図 1 に示す。使用した切りくずの形状およびカール方向は既報²⁾のとおりであり、No. 1, No. 4 および No. 6, No. 8 はそれぞれ斜め向き、横向き、上向きの切りくずである。切りくずの種類や輸送量が変わっても、圧力損失 ΔP は実験の範囲で管径の減少とともにほぼ直線的に増大している。

切りくずが鉛直管内を定常速度で輸送されるとき全圧力損失 ΔP は

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

* 原稿受付 昭和 58 年 2 月 19 日。昭和 56 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 56 年 3 月 28 日)、昭和 57 年度精機学会春季大会学術講演会(昭和 57 年 3 月 23 日)および昭和 57 年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和 57 年 10 月 20 日)にて発表。

** 正 会 員 福井大学工学部(福井市文京 3-9-1)

Fig. 1 Relationship between conveyer pipe diameter and pressure loss per unit conveying distance

で表される¹⁾。空気だけの管壁との摩擦損失 ΔP_{af} は、一定空気速度のとき管径が小さくなれば増大する。また切りくず輸送量が一定の場合、管径が小さくなるにつれて切りくずと管壁との摩擦損失 ΔP_{sf} および切りくずの浮遊、上昇に費やされる損失 ΔP_{sw} はともに増大する。そのため管径が小さくなるほど全圧力損失 ΔP は増大する。

一般に空気輸送するときの全圧力損失とそのときの空気速度で空気だけを流すときの圧力損失の比を圧損比 α と称している。ところで図1からわかるように管径が小さくなるとき、空気だけの摩擦損失に対して切りくずに関する損失の増加率が大きい。そのため図には示さなかったが、管径が小さくなるほど圧損比も大きくなるということが容易に推察されるであろう。

3.2 切りくず輸送量と圧損比

図2は、管径の異なる輸送管を用いて種々の切りくずを輸送するときの、切りくず輸送量 W_s と圧損比 α の関係を示す。圧損比は輸送量の増加とともに増大し、その増加率は管径が小さくなるほど増大することがわかる。圧損比が輸送量に比例的に増大する傾向は、前報に示したように一定管径で空気速度を変えた場合にも同様にみられた。したがって圧損比 α と輸送量 W_s の関係は、一般的小おおむね $\alpha = 1.0$, $W_s = 0$ の点を通る直線で、近似的に次式のように表される。

$$\alpha = 1 + \tan \theta \cdot W_s = 1 + K_s \cdot W_s \quad (2)$$

ここで θ は直線の傾き角である。 K_s は、空気速度が減少するほど、また管径が小さくなるほど大きくなる係数である。 K_s は切りくずの種類によっても異なる。

3.3 輸送動力と輸送管径

Fig. 2 Relationship between flow rate of chips and pressure loss ratio for various conveyer pipe diameters

Fig. 3 Relationship between conveyer pipe diameter and conveyance power

輸送動力 H は圧力損失 ΔP とそのときの空気流量 Q_a の積の形で表される。したがって切りくずを空気輸送するときの輸送距離1 m当たりの必要動力 H (kW/m) は、圧力損失 ΔP を kPa/m、空気流量 Q_a を m^3/s で表すと次式で求められる。

$$H = \Delta P \cdot Q_a / \eta \quad (3)$$

ここで η は空気機械の全効率である。

図3は η を仮に0.6として計算した輸送動力と管径の関係を示す。ここで空気速度 u_a は22 m/s一定としている。図より管径が増大するにつれて必要動力は増大することがわかる。この傾向は図1の圧力損失と管径の関係と逆である。それは、空気速度が一定の場合に、管径の増大による圧力損失減少の割合よりも空気量増大の割合が大きいためである。したがって一定空気速度で切りく

Fig. 4 Shapes of a washer type chip and cylindrical spiral chip

ずを輸送するときには、管径が小さいほうが効率のよい輸送ができることになる。

3.4 輸送中の切りくずの挙動

鉛直円管内を空気輸送される切りくずの挙動は、その形状、大きさ、カール方向あるいは空気速度によって異なるが、特にカール方向の影響が大きい。図4(a)はNo.6(横向きカール)、(b)はNo.8(上向きカール)の切りくずのスケッチである。(a)の座金状切りくずでは、空気の流れ方向 r の変動によって同方向の推力 R の大きさが大幅に変化し、切りくず速度の変化が大きくなる。また r に直角な揚力 S の大きさの変化も大きく、切りくず輸送経路が曲げられやすい。推力の変動や揚力が大きいことは切りくず同志の衝突や管壁との接触の機会を増し、切りくずの速度エネルギーを損じやすい。このような傾向は、一般に切りくずのカール方向が上向きから斜め向き、横向きになるほど強い。

写真観察の結果、次の4つの状態を繰り返しながら切りくずは輸送されていることがわかった。

i) 直進する切りくず

切りくずは不規則に回転しながら輸送されるが、空気の流れ方向に対する切りくずの姿勢が変わっても空気から受ける揚力に比較的変動が少ない場合、その切りくずは直進しやすい。具体的には、上向きカールの切りくずが斜め向きカールや横向きカールの切りくずよりも直進するようである。またこの状態で輸送されるとき、切りくず速度は高くなり、望ましい輸送状態と言える。

ii) 蛇行する切りくず

切りくずの姿勢や管内空気速度分布などの影響によって、切りくずは気流方向に直角の揚力を受ける。そのため旋回しながら蛇行する切りくずが観察される。一般的に空気速度が低下し浮遊速度に近づくにつれて、切りくずは気流中で不安定になり、直進から蛇行状態になりやすい。図5(a)は切りくずNo.6の蛇行状態の写真であり、ストロボフラッシュ間隔は1/200 sである。図5(b)は見やすいようにトレースしたもので、区間の平均速度を記入している。切りくずの姿勢と管内空気速度分布の影響で、切りくずは⑩点付近から太きい推力を受け加速

Fig. 5

(a) Photograph showing a pathway of a chip conveyor in a vertical transparent pipe (Strobe flashing interval; 1/200 s)

(b) Traced picture from 5 (a) (Mean speeds of a chip are shown)

されている。

iii) 衝突する切りくず

切りくずが受ける推力や揚力は刻々変化し、速度、方向が変化するため切りくず相互に接触あるいは衝突を起こす。図5(b)の①点で切りくずの接触、衝突が起っており、そのため切りくず速度が低下しているが、②点では回復している。

iv) 管壁に接触する切りくず

蛇行状態の切りくずは管壁に接触することもある。その場合管壁との摩擦抵抗だけでなく、管壁に近づくことで空気から受ける推力が減少するため、切りくず速度は低下する。空気速度が小さいほど切りくずは不安定で、蛇行しやすく管壁との接触の機会も多くなる。図5(b)の④点近傍で管壁に接触し、切りくず速度は漸減している。

切りくずの輸送中の挙動は以上のとおりである。多くの写真観察から、一般に空気速度が低いほど蛇行、相互の衝突および管壁との接触が多く、また切りくず輸送量が多いほど相互の衝突や管壁との接触を起こしやすいことがわかった。既述のように切りくずの挙動を観察しやすいように、蛍光塗料を噴きつけた切りくずを約5%混

Fig. 6 Relationship between air velocity and velocity ratio of chips No. 6 to air

せて写真撮影を行ったので、図5(a)中には見にくいほかの多くの切りくずが存在しており、それらの切りくずも上述の4つの挙動を繰り返しながら輸送されているはずである。

3.5 空気速度と速度比

管内を輸送される切りくずの平均速度 u_s と管内空気流速の平均速度 u_a の比 u_s/u_a を速度比 ϕ と定義する。すべての切りくずについて輸送量を4種類 (0.02, 0.04, 0.06, 0.08 kg/s) に変えて、空気速度 u_a と速度比 ϕ の関係を調べたが、結果の一部を図6に示す。図は切りくず No. 6 の場合 (管径 76.1 mm) で、繁雑のため輸送量 0.02 kg/s および 0.08 kg/s についてのみ示した。なお横軸には輸送管内径を基準としたフルード数をあわせて示した。また切りくず速度 u_s の測定には図5(a)のような写真を利用したが、その平均速度はかなり変動するので、同一条件について約10枚の写真撮影を行った。

図6からわかるように、速度比は空気速度の増大とともに増大するが、その増加率はしだいに減少している。このような傾向は、切りくずに重力および輸送空気よりの推力のみが働いた簡単な理論解析³⁾によって説明できるが、そのほかに次のような理由が考えられる。空気速度が低下すると前述のように切りくずは蛇行状態になりやすく、切りくず相互の衝突や管壁との接触による切りくずの速度低下の機会が多くなる。反対に空気速度が増すと切りくずは直進しやすくなり、速度エネルギーを損ずる機会が少なくなり、切りくず速度は増し、速度比も大きくなる。しかしその効果も空気速度の増加につれて少なくなり、速度比はほぼ一定値に近づくようである。また同じ空気速度に対して切りくず輸送量が多くなると速度比は小さくなっている。理論的には速度比は混合比 (空気速度が一定とすれば切りくず輸送量) によって変わらない。しかし切りくず輸送量が多くなると、切りくず相互の衝突や管壁との摩擦による速度エネルギーの損失の機会が多くなり、そのため上述のような結果になったと考えられる。しかも空気速度が低いほど切りく

Fig. 7 Relationship between projected area per unit mass of a chip and velocity ratio
Conveyer pipe diameter: 76.1 mm

ずは蛇行しやすく、上述の影響を大きく受けるので、空気速度が低い場合に切りくず輸送量による速度比の差が大きくなっており、空気速度が高くなると切りくず輸送量の影響は小さくなる。

3.6 切りくず受圧面積と速度比

図7は切りくず受圧面積と速度比の関係を示す。既述のように、切りくず速度は図5(a)のようなストロボ写真から求めたが、No. 13, No. 14 および No. 15 の切りくずは、数個がからまって輸送される場合が多くみられ、また No. 11 および No. 16 の切りくずは、輸送管径に対して相対的に長く、切りくず同志の干渉や管壁接触したものが多く観察された。そのためそれらの切りくずの輸送速度の測定値にはばらつきが多く、しかもその平均値は小さめになっていると思われる。したがってそれらの切りくずについては⊗印で区別し、実験直線はその他の実験点 (○印) によって記入した。しかし個々の切りくず挙動でなく、輸送切りくずの平均的挙動の結果として測定される最小圧損空気速度 (前報図7¹⁾) や浮遊速度 (未発表) と切りくず受圧面積の関係はほぼ直線的であり、前述の切りくずがそろって直線の片側にはずれる傾向はみられなかった。したがってそれらの切りくずについても多くの写真観察を行ってその平均値を求めると、図中の直線に近づくものと考えられる。

切りくず速度比は図に示すように受圧面積の増大とともに大きくなり、両者の関係は片対数図上で直線的である。粉体を鉛直に空気輸送するときの難易は主として粉体に働く重力と空気から受ける推力によって決まる。一定の空気速度に対して切りくずの受ける推力は空気流れ方向への投影面積と抵抗係数によって決まる。ところで切りくずはその形状や大きさが種々雑多であり、抵抗係数はそれぞれ異なる。しかし抵抗係数にあまり大きい差異がないとすると、切りくずの受ける推力は主として投

影面積によって決まることになる。したがって単位質量当たりの切りくずの投影面積すなわち受圧面積²⁾が大きいほど切りくず速度は高まり、速度比も大きくなる。前報で切りくず受圧面積が大きいほど圧力損失が少ないことを示した。それらを考えると、切りくず受圧面積は輸送しやすさを判断する一つの目安とすることができると言える。

輸送中の切りくずの挙動を観察した結果、先に述べたように上向き切りくずに対して斜め向きから横向きになるほど、流れに対する姿勢の変化による投影面積の変化が大きく、空気から受ける推力および揚力の変動が大きく、切りくず相互の衝突や管壁との接触を起こしやすく、速度エネルギーを損ずる機会が多くなる。そのため受圧面積が同程度であれば、形状として上向き切りくずが輸送上都合がよいと言える。

4. 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) 一定空気速度の場合、輸送管径の増大につれて圧力損失は減少するが、輸送動力は逆に増大する。
- (2) 圧損比 α と切りくず輸送量 W_s の関係は $\alpha = 1 + K_s \cdot W_s$ で近似でき、係数 K_s は輸送管径が小さいほど大きい。

ど大きい。

- (3) 輸送管内の切りくずは直進、蛇行、相互衝突および管壁接触の4つの挙動を示す。一般に空気速度が低くなる時、また切りくず形状が上向きカールから斜め向き、横向きになるにつれて、速度エネルギーを損ずる蛇行、相互衝突、管壁接触の機会が多くなる。
- (4) 速度比は空気速度の増大とともに大きくなるが、その増加率は減少する。
- (5) 速度比は切りくず輸送量が多くなると小さくなり、空気速度が高くなるとその影響は少なくなる。
- (6) 切りくずの受圧面積が大きいほど速度比は大きく、受圧面積を切りくずの輸送しやすさの目安とすることができる。

参 考 文 献

- 1) 湊 喜代士, 豊島敏雄: 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, 精密機械, 47, 2 (1981) 228.
- 2) 湊 喜代士, 豊島敏雄: 切りくず処理に関する研究——切りくずの油流し処理法, 精密機械, 43, 7 (1977) 849.
- 3) 狩野 武: 粉粒体輸送装置, 日刊工業新聞社 (1975) 92.

◆図書紹介◆

精機学会自動組立専門委員会編 「自動組立の基礎と応用」

——精密工学テキストシリーズ1

本書は、精機学会が毎年開催している「自動組立技術に関する講習会」のテキスト用として発行されたものである。精機学会自動組立専門委員会のメンバーを中心とする14人の執筆者がそれぞれの専門の分野に関して執筆している。

章の構成は、序章・自動組立の現状、第1章・自動組立システム、第2章・製品設計と工程設計、第3章・移送、第4章・部品自動供給装置、第5章・部品の整列・選別の方法、第6章・装入、第7章・結合、第8章・計測、第9章・組立機械の制御、第10章・組立用ロボット、第11章・自動車用エンジンの組立、第12章・自動車用メータゲージの組立、第13章・電

子部品の自動組立、第14章・腕時計の自動組立、第15章・カメラの自動組立、となっており、自動組立に関する基本事項から、各業種における応用例までがくまなく記載されている。

特に、最近の話題となっているロボットによるフレキシブルな自動組立については、そのシステムとしての考え方から実際のラインへの導入例までが各章で述べられており、従来の専用機的な自動組立だけを取り扱っていた類書とは違って、新しい内容のものとなっている。

発行・精機学会、A5版、262ページ