粉体輸送の現状と課題

Conveying of Powder—State of the Art and Some Topics in Future—

富田 侑 嗣*

Yuji TOMITA*

Key Words : Pneumatic Conveying, Flow Patterns, Phase Diagram, Dense Phase Conveying, Design Considerations

1. はじめに

材料の粉体や粒子による操作の重要性が増すにつれ、各種単位操作間における粉体の輸送需要が高まり、併せてさまざまな要求が輸送法に課せられ、その解決を迫られている。本文では粉体輸送のこのような現状を概観し、どのような課題が課せられているか、検討してみたい。

2. 空気輸送の現状と課題

2.1 流動様式線図

種々の粉体が空気輸送で送られる傾向にある。空気輸送には粉体を管内にそのまま投入して輸送気流と直接接触させる「ばら」状輸送と、容器に粉体を充填してこの容器を空気で送るカプセル輸送がある。カプセル輸送では、輸送の始点と終点でのカプセルのハンドリングと粉体のカプセルへの投入、排出といった操作が必要になる。粉体の輸送に対してカプセル輸送の需要はまだ少ない。以下、ばら状輸送について述べる。

ばら状輸送は固気二相流に分類される。固体粒子と気体の密度差が大きいので、管内固気二相流は気流の方向と重力の方向とに影響され、更に、対象とする固体粒子も大きさ、密度、形状等に関して広範囲にわたるので、多種多様な流動様式を示す。しかし、流動様

式の分類は確立されたとはいえない。流動様式に関連づける線図として、現在よく使われているのは、与えられた管径 D 毎に、長さ当たりの圧力降下 $\Delta p/L$ を粒子の質量流量 G_s をパラメータとして（見かけの）空気速度 U に対して示す特性線図である。与えられた G_s は種々の U と D で輸送でき、 U 、 D に応じて必要な $\Delta p/L$ が定まる。よって、空気輸送の設計では D と U の決定が求められ、その決定には流動様式の選定が大きく影響する。

2.2 高濃度低速輸送

ばら状輸送では、粒子は管壁と直接接触するので、粒子の破碎や管の摩耗は避けられない。これらは輸送速度を下げるにより低減でき、且つ、場合によっては所要動力の低減も期待できるので、濃度等に特別の指定がない限り、低速輸送が志向される。図1は水

図1 水平管における空気輸送の特性線図

1997年2月28日受付

*九州工業大学工学部

(〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1) TEL. 093-884-3157

(著者紹介)

昭和40年九州工業大学卒業、昭和45年東京大学大学院博士課程修了。九州工業大学講師を経て、昭和58年より同教授。

専門：流体工学、粉体工学、パイプラインによる物体の輸送及び関連周辺機器の研究。

図2 水平管における流動様式

図3 鉛直上昇管における空気輸送の特性線図

平管での特性線図を模式的に示す。aは空の管、bは粒子が充満した管、cは管底に粒子堆積層がある管を、それぞれ空気だけが流れる場合 ($G_s = 0$) の関係を示す。輸送はこれら3本の曲線で囲まれた領域で可能である。図2は水平管で観察されている低速輸送の流動様式を示す。管全体を充満しながら輸送されるしゅう動流H1、堆積層中を管を塞ぎながら輸送されるスラグ流H2、堆積層を伴わず粒子が一体となって管を塞ぎながら輸送されるプラグ流H3、堆積層を伴う浮遊流H4、砂丘状流れH5、粉体が層状に輸送される成層流(あるいは紐状流れ)H6、軸方向に濃度の疎密がある脈動流H7などが観察されている。プラグ流は U が粒子の浮遊速度 u_g 以下で観察される。その

図4 鉛直上昇管における流動様式

図5 ゲルダート線図

ほか、エアースライドとして知られている流動層流がある。フィーダや二重管、バイパス管等によってこれらの流動様式を制御する技術も開発されている。

図3は鉛直上昇管の特性線図を示す。上昇流は、図1のcの代りに粒子の正味の輸送がなく浮遊する粒子中を気流が流れる場合(流動層の関係、 $U_{mf} \leq U < u_g$)のdと前述のa、bとで囲まれる領域で可能になる。図4は鉛直管での流動様式を示す。水平管と同様なしゅう動流V1、エアリフトとして知られる流動層流V2、水平管でのスラグ流に対するものとしてスラッキング流動層のように粒子スラグから粒子の落下を伴う流れV3、プラグ流V4、堆積の代わりに逆流を伴う流れV5、クラスターを含む流れV6、管壁近傍で濃度が大きい成層流V7がある。

成層流、流動層流、しゅう動流等ではどこでも粒子は常に連続的に流れており定常流的であるのに対して、プラグ流等では粒子は明らかに間欠的に輸送され、非定常流的^{*1)}である。このため、 $\Delta p/L$ は時間

*1) 流れの連続性や定常性は我々の観測の視野や時間の尺度による。プラグ流でもこれらの尺度を十分大きくとれば連続流、定常流とみなせる。一般には、我々の要求精度に応じてどのような見方も可能である。

的に大きな変動をあらわし、 $\Delta p/L$ 、 U 、 G_s のみでそれらの流動様式を特性線図上に一義的に位置づけることができない。

2.3 ゲルダート線図

前節で述べた流動様式は、どのような粉体についてもどのような大きさの管路においても必ず観察されるものではない。流体による流動化の目安を与える線図として、粒子と流体の密度差 $\rho_s - \rho_f$ と粒径 d の関係で粉体を分類するゲルダート線図（図5）がある¹⁾。グループAは、流動化開始速度 U_{mf} と気泡初生速度 U_{mb} に差があり、 $U_{mf} \leq U \leq U_{mb}$ で均一流動化域をもつ粉体である。グループBは、 U_{mf} と U_{mb} がほぼ等しく均一流動化域をもたず気泡流動層になりやすい粉体である。グループCは、チャネリングが起りやすく、流動化が困難で付着性が大きい粉体である。グループDは、気泡の上昇速度 u_b がまわりの空気速度 U_{mf}/ε_{mf} より遅く、噴流層になりやすい粉体である。

このような観点からの粉体の分類は空気輸送にも有用であり、ブロータンク輸送の適性に関する Lohrmann の研究によれば、グループAが最も送りやすく、次いでグループB、グループDはスラグ流になりやすい²⁾。実際、スラグ流は通気抵抗の小さい粒状物質（グループD）の低速流で容易にみられる。

（堆積や逆流のない）理想的なプラグ流は、付着性の微粉炭や珪藻土のような粒子間の結合や絡み合いが強いもので観察されるようである。成層流も粉末に見られる流れである。しゅう動流は、出口端に絞りのような抵抗を置くことによって、粒子間に強い有効応力を発生させ、粒子間の相対運動を拘束する場合に見られる。従って、通気抵抗の小さい粒状物質で観察される。しかしながら、短い管路に限定されている。

空気輸送が難しいもの、あまり使用されていないものとしてペースト状、付着性の粉体、水分の多いもの、壊れやすいもの、微粒子があげられる。グループCのような微粒子は液体のように輸送することも可能なようで興味深く³⁾、今後の研究が期待される。

更に、静電気や湿分の影響も今後取り上げられねばならない課題である。

2.4 ヤンセンの式

プラグ流のように管を充満しながら輸送される場合、粒子は壁に拡張するような力を及ぼしたり、あるいは壁によって強い拘束力を及ぼされたりすると考えられる。このような原因から生じる垂直力によってプラグの運動に摩擦力が発生する。ヤンセンの粉体圧の理論によれば、例えば、直径 D の鉛直管に密度 ρ_s の

非付着性粉体を高さ y だけ充填し、これをピストンで下から押し上げるときに必要な力 F は

$$F = \frac{\pi D^3 \rho_s (1 - \varepsilon) g}{16 \mu_w \lambda} \left\{ \exp \left(\frac{4 \mu_w \lambda y}{D} \right) - 1 \right\} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 ε は空隙率、 μ_w は壁摩擦係数、 g は重力の加速度、 λ は半径方向と軸方向の粉体圧の比 σ_r / σ_y で、運動には関係しない。上式は F が y とともに指数関数的に増加することを示している。充填高さが短いと押すことができるが、長くなるとほとんど動かせないことになる。細い管ほど閉塞しやすいのもこれによって説明できる。

スラグ流に対する粉体圧の計算モデルは幾つかあるが、ヤンセンの理論を修正したものに Konrad ら⁴⁾ のモデルがある。軸方向の粉体圧 σ_y の一般解を、 A を積分定数として水平管に対して次式を与えている。

$$\sigma_y = A \exp \left(- \frac{4 \mu_w K}{D} y \right) + \frac{D}{4 \mu_w K} \left[\frac{\Delta p}{l} - 4 \left\{ \frac{\mu_w \rho_s (1 - \varepsilon) g}{2} + \frac{c_w + \mu_w (K + 1) c \cos \phi \cos (\omega + \phi_w)}{D} \right\} \right] \quad (2)$$

c は粒子間付着力、 c_w は粒子と壁との付着力、粉体は壁摩擦で受動的（粉体が壁から押される）に崩壊するとした場合である。 K 、 ω は次式で与えられる。

$$K = \frac{1 + \sin \phi \cos (\omega + \phi_w)}{1 - \sin \phi \cos (\omega + \phi_w)} \quad (3)$$

$$\sin \omega = \frac{\{\sigma_y + c \cos \phi + c_w (1 - \sin \phi) \cot \phi_w\} \sin \phi_w}{\{\sigma_y + c \cos \phi + c (1 - \sin \phi) \cot \phi\} \sin \phi} \quad (4)$$

ϕ は内部摩擦角、 ϕ_w は壁摩擦角である。上式は K を一定として積分している。プラグ流では前後に粒子がないので両端で σ_y は0である。よって、 σ_y はプラグ内で0になるので、

$$\frac{\Delta p}{l} = 2 \mu_w \rho_s (1 - \varepsilon) g + \frac{4}{D} \{ c_w + \mu_w (K + 1) c \cos \phi \cos (\omega + \phi_w) \} \quad (5)$$

となり、 Δp は l に比例する。鉛直管の場合は

$$\frac{\Delta p}{l} = \rho_s(1-\varepsilon)g + \frac{4}{D}\{c_w + \mu_w(K+1)c \cos \phi \cos(\omega + \phi_w)\} \quad (6)$$

となる。非付着性粉体では c と c_w は 0 になる。

プラグ輸送は、その生成や安定なプラグの維持が難しいが、輸送前に後端を圧密するとよいとされる⁵⁾。このとき Δp は l と共に指数関数的に変化する。圧密によって空気の透過が無視できるとすれば、プラグは板（圧密層）で押され、この板に空気圧がかかると考えることができるので、

$$(\sigma_y)_{y=l} = \frac{D}{4\mu_w K} \left\{ \exp\left(\frac{4\mu_w K l}{D}\right) - 1 \right\} \times \{2\mu_w \rho_s(1-\varepsilon)g + \frac{4}{D}\{\mu_w(K+1) \times c \cos \phi \cos(\omega + \phi_w) + c_w\}\} \quad (7)$$

をうる。よって、この場合、長いプラグより短いプラグの方が動力的に有利といえる⁵⁾。実際には堆積や逆流を伴ったスラグ輸送が多いが、この場合も同じモデルが使われる。

なお、プラグ輸送やスラグ輸送の所要動力は小さいといわれているが、正確な評価はまだなされていない。

2.5 所要動力

$\Delta p/L$ は与えられた G_s と D に対してある $U_{\min}$ で最小となる。 $U_{\min}$ 付近の流れは脈動的で不安定であり、これによる $\Delta p/L$ の増加に対してターボ式送風機のように吐出圧の余裕が少なければ容易に管路閉塞に至る。このため実際には、 $U_{\min}$ 付近の $U_{\min}$ より大きい安定輸送限界の U が設計速度に選ばれてきた。しかしながら、圧縮機の性能向上や流動様式の解明につれ、低速輸送が可能になった。

所要動力は $\pi D^2 U \Delta p / 4$ に比例するので、所要動力の低減のためには、これを最小にする U と D を求めるべきである。与えられた D で所要動力最小となる風速 U_p は $U_{\min}$ より小さく⁶⁾、流動様式は管底流で脈動流的で、更に不安定であり、 Δp は U に対して急変化し、 $U_{\min}$ より容易に管路閉塞に陥りやすい。したがって、安全のため $U_{\min}$ 付近の U が選定される。しかし、制御技術を応用して、この点の輸送を行なうシステムが多数開発されている。センサーによって流動

状態を常時監視し、閉塞しそうな場所を探知したときは小口径の空気管から閉塞解消用空気を送り込むものである^{7, 8)}。

前述のように、 U と D を決定するには独立な二つの関係式が必要である。 U については $U_{\min}$ として多くの研究がなされているが、もう一つの関係式については確立したものはなく、多くの場合、濃度もしくは混合比が経験に基づいて与えられる。ガス輸送では、 U が同じであれば、損失は D が大きいほど小さいので、 D は大きいほうが有利である。空気輸送では D の問題はまだ解決されていない。 G_s に対して U_p や $U_{\min}$ の D との関係が要求されている。このことも、流動様式が特性線図に明確に位置づけられてないことによるといえる。

2.6 設 計

エネルギー需要はほとんどすべての分野で年々増加しており、新しいエネルギー源が開発されるとしても、環境対策から省エネルギーは重要である。輸送もできるだけ所要動力が最小になるよう設計すべきである。最適輸送においても、できるだけ設計精度を上げて要求仕様に合わせるべきで、過大な装置にしないことである。複雑な計算も容易に高精度で出来るので⁹⁾、計算式と用いるデータの信頼性を高めることが重要である。正確なデータを得るための新しい実験とともに、これまでのデータの再評価も有用である¹⁰⁾。例えば、圧力降下の計算を考えてみよう。連続体モデルを基準にすれば、これまで使用された仮定や近似は必ずしも必要でない。例えば、発達した流れ、定常流、非圧縮流れ、等温流れ、摩擦係数一定等の仮定である。最終的に、計算精度は計算に使用される各種係数や摩擦や各種の局所損失の精度に依存することになると考えられる。一方、各種損失特性が正確に把握されれば省エネルギー等の対策がとれる。例えば、摩擦損失は速度と共に増加するので、安定限界の速度（設計速度）を保つようにすればよい。空気輸送では圧力降下が大きいと空気の膨張により、速度は下流に向かって増加する。これを避けるには、管径を下流に向かって大きくして速度増加を避けることが極めて効果的である¹¹⁾。他方、 D が一定のラインでは、同じ理由で輸送管入口近くの加速区間で U が小さいので、ここで設計速度を確保することが重要である。

空気輸送の特長の一つは管路を自由にとれることであるが、これはバンドによっている。一方、バンドは圧損が大きく、最も摩耗しやすい。更に、粒子の減速により流れの閉塞の原因になりやすい。設計ではベン

ドの使用は避けたいところである。ベンドについては従来、圧損や閉塞の考慮から大きな曲率半径が使用されていたが、最近ではむしろ小さい方が有利であること、摩擦を少なくするには、単相流で最も損失が大きいティーベンドの方が圧損に関してもむしろ有利であることが示されている²⁾。しかし、ベンドの研究はまだ十分とはいえない。

2.7 相似則

空気輸送の理論的定式化はなお困難なので、設計では従来の経験や実験が重要になる。大型装置の設計では模型実験が行われる。この目的に相似則が使われる。問題に関与する因子を的確に把握することが正確な予測のポイントになる。例として、実機は $D = 500\text{mm}$ の管で、粒径 $d = 2\text{mm}$ 、 $\rho_s = 1200\text{kg/m}^3$ の粒子を $G_s = 10\text{ t/h}$ で $U = 25\text{m/s}$ で輸送するとき必要な $\Delta p/L$ を、 $D^{(m)} = 50\text{mm}$ の管での模型実験から求めるものとする。添字^(m)は模型を示す。 $\Delta p/L$ は ρ 、 U 、 D 、 G_s 、 ρ_s 、 d の他に空気密度 ρ_a 空気の粘度 μ 、重力加速度 g にも関係するとし、使用する管と粒子の材質は実機と同じとすれば、次のようにおくことができる。

$$\Delta p/L \propto \rho_a, U, D, G_s, \mu, \rho_s, d, g \quad (8)$$

これを ρ_a 、 U 、 D によって次元解析すれば次式を得る。

$$\frac{\Delta p}{L} = \Phi \left(Re, Fr, m, \frac{\rho_s}{\rho_a}, \frac{d}{D} \right) \frac{\rho_a U^2}{2D} \quad (9)$$

実験条件は、相似パラメーターと呼ばれる無次元数 $Re = \rho_a DU / \mu$ (レイノルズ数)、 $Fr = U / \sqrt{gD}$ (フルード数)、 $m = 4G_s / \pi \rho_a D^2 U$ (混合比)、 ρ_s / ρ_a (密度比)、 d/D (無次元粒径) を実機と模型でそれぞれ同じにすることである。実機の値は今の場合 $Re = 8.33 \times 10^5$ 、 $Fr = 11.3$ 、 $m = 6.11$ 、 $\rho_s / \rho_a = 103$ 、 $d/D = 4 \times 10^{-3}$ である。同じ空気密度 ($\rho_a^{(m)} = \rho_a$)、同じ空気粘度 ($\mu^{(m)} = \mu$)、同じ重力場 ($g^{(m)} = g$) で実験するとすれば、 Fr の一致より実験風速は $U^{(m)} = 7.9\text{m/s}$ 、 m の一致から実験の輸送量は $G_s^{(m)} = 8.78\text{ g/s}$ となる。更に、 d/D の一致から $d^{(m)} = 0.2\text{mm}$ 、 ρ_s / ρ_a の一致から $\rho_s^{(m)} = 1200\text{kg/m}^3$ となる。このとき、 Fr ではなく、 Re を合わせようとすれば $U^{(m)}$ は逆に 250m/s と大きくせねばならず、 $G_s^{(m)}$ も 1t/h となる。このように、一般に、すべての相似パラメータを合わせることは困難である。従って、重要な相似パラメータは残して、影響の小さいものは除去せねばならな

い。 Fr を合わせたとき実験の $Re^{(m)}$ は 2.63×10^4 であり実機の Re より小さい。しかし、 $\Delta p/L$ は Re のこの程度の変化では、普通、大きく変化しないので、 Re (すなわち μ) を相似パラメータから除去することができる。一般に、極端に大きいか小さい値をとる相似パラメータは除去される^{*2)}。よって、

$$\Delta p/L = (\Delta p/L)^{(m)} \quad (10)$$

となり、 Fr の相似則では実験値の $(\Delta p/L)^{(m)}$ がそのまま実機の $\Delta p/L$ と予測される。相似則は相対的に考えるので、絶対値が問題になるような状況では縮尺比 $D^{(m)}/D$ の限界に検討が必要である。今の例では、 Fr 、 m 、 d/D を合わせるとき、実機と実験の流動様式は同じとしているが、確認が必要である。

2.8 その他

固気二相流の数値流体力学 (CFD) による研究は盛んであり、多くの成果が得られている。空気輸送への導入は可能であり¹²⁻¹⁴⁾、今後、最も真剣に取り組むべき課題の一つといえる。CFD は一種の超精密計測器ともいえる。究極的には輸送システム内の粉体の流れを粒子単位でオンラインで可視化することも原理的に可能である。このためには、計算方式、計算機等にかんがりの進展が必要であろう。CFD の進展に伴い、近似や仮定が不要になると考えられ、同時に計算に必要なデータも少なくなってくるであろう。また、必要なデータの項目も変化してくるであろう。これまで空気輸送研究で蓄積されてきた膨大なデータの評価も変わってくるに違いない。

最近、旋回流を応用した空気輸送が開発されている。管壁との接触を避けることができたり¹⁵⁾、粒子の配向を変えずに送ることができるといわれている¹⁶⁾。又、 U_p や $U_{\min}$ を小さくするため、旋回流や¹⁷⁻¹⁹⁾ ねじれ管²⁰⁾ を使用するシステムも研究されている。このように新しい方式の研究開発も積極的に取り組むべき課題であろう。

また、システムの問題として圧力差のある場所への粉体の連続供給・排出システムの開発、性能向上も効率的運用という点から極めて重要である。このような周辺機器の性能向上も見落としてはならない。

粉体輸送が需要に柔軟に応えるには、輸送の安定と共に、輸送の制御性も重要である。このためには輸

* 2) ただし、このためには従属変数の無次元数、今の場合、 $\Pi = (\Delta p/L) / (\rho_a U^2 / 2D)$ が独立変数の無次元数、例えば Re を大きくするか、小さくするとき急速に一定値に漸近することが必要である。このとき、 Re を変えても Π は変化せず Re の関数ではなくなるので Π の独立変数から除外できるのである。あるいは、実験の Re はこのような範囲にあればよいといえる。

送量の高精度のオンライン計測も必要である。種々の方法が開発されているが、まだ十分とはいえない。

粉体は流体と異なった特性をもつので、このような特性を巧みに利用した輸送機器の開発も考えられる。

粉体を水やガスの輸送のように、バルブの開閉一つで自由にトラブルなく管路から取り出せるようなシステムを開発することも今後の課題であろう。

3. 機械式輸送の現状と課題

機械式輸送法の粉体工学的観点からの研究は比較的小さい。空気輸送に比べると問題点も少ないためであろう。コンベヤーへの粉体供給等における周辺機器が原因で生じるトラブル、輸送中の発塵による環境汚染の問題、急勾配輸送等が課題といえるが、管状にベルトを閉じて輸送する方式等が開発されており、管路輸送の特長が取り入れられつつある。マスフローコンベヤーのように原理的に興味深いものもあるが、基本的には粉体を容器に載せて、容器を動かすものであるから、容器での粉体の静力学的問題として扱える場合が

多い²¹⁾。しかしながら、粉体工学の理論や最近の成果を適用した技術革新や性能改善の余地はかなりあると思われる。

4. むすび

粉体の輸送需要は今後とも増加し続けるといえる。空気輸送では高濃度低速輸送が相変わらず大きな方向であり、粉体工学的な扱いが益々重要になってくると考えられる。気中粉体の力学的物性研究には多くの問題が未解決のままに残っており、今後の研究開発の展開が期待される。粉体輸送ではほとんどすべての場合、重力の恩恵を何らかの形で受けている。粒子の集合が粉体として独特の特性をもつのも重力のためといえよう。原料の効率的処理において微粉化、粉体化が進められてきたが、宇宙での将来の生産活動においても原料の粉体的特性が重要であるとすれば、微小重力下での粉体輸送も一つの研究課題となりうるのではないだろうか。

使用記号

A	: 積分定数	(Pa)	U_{mf}	: 流動化開始速度	(m/s)
c	: 粒子間付着力	(Pa)	U_{min}	: G_s = 一定の下で $\Delta p/L$ を最小にする U	(m/s)
c_w	: 粒子と壁の付着力	(Pa)	U_p	: G_s = 一定の下で $\pi D^2 U \Delta p/4$ を最小にする U	(m/s)
D	: 管直径	(m)	y	: 粉体層の高さ	(m)
d	: 平均粒径	(m)	ε	: 空隙率	(-)
F	: 力	(N)	ε_{mf}	: 流動化開始点の空隙率	(-)
Fr	: フルード数 ($U/\sqrt{gD}$)	(-)	λ	: 半径方向と軸方向の粉体圧の比 σ_r/σ_y	(-)
G_s	: 粉体の質量流量	(kg/s)	μ	: 空気の粘度	(Pa·s)
g	: 重力の加速度	(m/s ²)	μ_w	: 壁摩擦係数	(-)
K	: 式 (3) で定義される係数		Π	: 無次元数	(-)
l	: プラグの長さ	(m)	ρ_a	: 空気の密度	(kg/m ³)
m	: 混合比、粉体と空気の質量流量比	(-)	ρ_f	: 流体の密度	(kg/m ³)
Δp	: 圧力差	(Pa)	ρ_s	: 粒子の物質密度	(kg/m ³)
$\Delta p/L$	: 管に沿う長さ当りの圧力降下	(Pa/m)	σ_r	: 半径方向の粉体圧	(Pa)
Re	: レイノルズ数 ($= \frac{\rho_a D U}{\mu}$)	(-)	σ_y	: 軸方向の粉体圧	(Pa)
U	: 管内の見かけの空気速度	(m/s)	Φ	: 無次元関数	(-)
u_b	: 気泡上昇速度	(m/s)	ϕ	: 内部摩擦角	(-)
u_f	: 浮遊 (自由落下) 速度	(m/s)	ϕ_w	: 壁摩擦角	(-)
U_{mb}	: 気泡初生速度	(m/s)	ω	: 式 (4) で定義される角度	(-)
			上付添字 (m): 模型		

引用文献

- 1) Geldart, D.: "Types of Gas Fluidization", *Powder Technol.*, 7, 285-292 (1973)
- 2) Klinzing, G. E., N. D. Rohatgi, A. Zaltash and C. A. Myler: "Pneumatic Transport - a Review (Generalized Phase Diagram Approach to Pneumatic Transport)", *Powder Technol.*, 51, 135-149 (1987)
- 3) Krambrock, W. and S. Parekh: "Pneumatic conveying of poor flowing abrasive or fragile bulk materials", *Proc. of Pneumotransport 5*, BHRA, Paper J3, pp. 419-442, Cranfield, U. K. (1980)
- 4) Konrad, K., D. Harrison, R. M. Nedderman and J. F. Davidson: "Prediction of the Pressure Drop for Horizontal Dense Phase Pneumatic Conveying of Particles", *Proc. of Pneumotransport 5*, BHRA, Paper

- E1, pp. 225-224, Cranfield, U. K. (1980)
- 5) Aziz, Z. B. and G. E. Klinzing : "Optimizing the Performance of a Plug Flow System", *Powder Technol.*, **62**, 77-84 (1990)
 - 6) 越智光昭 : "水平管内固気二相流における経済輸送流速", 日機論B, 60巻578号, 3392-3396 (1994).
 - 7) Heep, D. and G. Winkhardt : "Application and Optimization of a Dense - Phase Carbon Black Conveying System in a Tyre Works", *bulk solids handling*, **15-1**, 53-63 (1995).
 - 8) Paul, K. : "Preventing Plugging During Ultra-Slow Velocity Conveying", *Chem. Eng. Progress*, **90-8**, 72-76 (August 1994).
 - 9) Reed, A. R. and M. S. A. Bradley : "Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems A United Kingdom Perspective, *bulk solids handling*, **11-1**, 93-97 (1991).
 - 10) Weber, M. : "Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying", *bulk solids handling*, **11-1**, 99-102 (1991).
 - 11) Wypych, P. W., A. C. Arnold and W. R. Armitage : "Demands of Long-Distance and Large-Throughput Pneumatic Conveying Applications in Australia, in *Freight Pipelines*" : Proc. 6th Int. Symp. on Freight Pipelines, edited by H. Liu and G. F. Round, Hemisphere Pub. Co., 81-87 (1990).
 - 12) 田中敏嗣, 石田俊哉, 辻裕 : "水平管内粒状体プラグ流の直接数値シミュレーション (付着力がない場合)", 日機論B, 57巻534号, 456-463 (1991).
 - 13) 田中敏嗣, 米村茂, 霧林謙, 辻裕 : "固気二相流のクラスター形成と流動の不安定化 (DSMC法による鉛直チャンネル内流れの数値シミュレーション)", 日機論B, 59巻, 566号, 2982-2989 (1993).
 - 14) 田代博之, 彭新建, 富田侑嗣 : "水平管内固気二相流におけるサルテーション速度の予測に関する数値実験", 日機論B, 61巻589号, 3210-3214 (1995).
 - 15) 松下電工 : "うず流式部品輸送システム" AIR WAY, No. 制御E-05, 4月 (1994)
 - 16) Horii, K., S. Matsumae, K. X. M. Cheng, M. Takei and B. Hashimoto : "A Study of Spiral Flow (Part 3) - Opening and Orientation Control of Fiber by Spiral Flow", *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, Vol 32, No. 98, 155-164 (1990).
 - 17) 李輝, 富田侑嗣, 船津勝也 : "水平管における旋回流空気輸送の研究 (第1報, 圧力損失と流動様式)", 日機論B, 58巻549号, 1599-1604 (1992).
 - 18) 李輝, 富田侑嗣 : "水平管における旋回流空気輸送の研究 (第3報, 動力係数と付加圧力損失係数)", 日機論B, 59巻559号, 756-761 (1993).
 - 19) 李輝, 富田侑嗣 : "鉛直管における旋回流空気輸送の研究 (圧力損失と流動様式)", 日機論B, 60巻, 572号, 1263-1268 (1994).
 - 20) 渡辺敬三, 内田昇, 加藤宏 : "ねじれ管による粉粒体の空気輸送に関する研究 (第1報, 水平管路の圧力損失)", 日機論B, 54巻508号, 3362-3369 (1988).
 - 21) Roberts, A. W. : "Advances in the Design of Mechanical Conveyors", *bulk solids handling*, **14-2**, 255-281 (1994).