低流速域での水平管内空気輸送特性(第1報)

—粒子群の流動状態—

越 智 光 昭*, 池 森 亀 鶴*

Flow Characteristics in Horizontal Pneumatic Conveyance at Low Air Velocities(Part 1) —Solid Flow Patterns—

by

Mitsuaki OCHI[†] and Kikaku IKEMORI[†]

To investigate the flow characteristics with the steady state pneumatic transportation of solids in horizontal pipes at low air velocities, in this paper, instantaneous photographs of solid flow patterns were taken with a camera simultaneously operated with a stroboscope. The experimental results were as follows: solids tend to settle out along the bottom of the pipe and form dunes at a periodic interval. The height and the length of each dune under such condition is related to the solids-gas flow ratios, as well as to air velocity. However, when the solids-gas ratios are more than 10, these values become constant independently of the solids-gas ratios. On the other hand, the angle of slope, and the pitch length of each dune are independent of the extent of air velocity and solids-gas ratios.

Key Words : Multiphase Flow, Pneumatic Conveyance, Low Air Velocity, Solids Flow Pattern, Solids-Gas Ratio

1. 緒 言

従来一般の固体粒子の管内空気輸送では、粒子質量流量を一定にして輸送流速を変えると、全圧力損失が最小になる流速(圧損最小流速)があることが知られている。ここで圧損最小流速から粒子の定常輸送が可能な限界の流速(準限界流速)までの範囲を低流速域(以下低流速域と記す)、それより大きい流速側を高流速域とする。空気輸送を低流速域で行えば運動力の節約に

なり、また輸送中の粒子のこわれや管壁の摩耗も少なくなるなど利点が多い。しかしその反面、流速が準限界流速より低下すると閉そくの危険な事態が発生しがちであり、運転条件の設定は微妙で、適切な輸送プラントの設計や運転操作には、低流速域での粒子の流動状態と輸送特性についての十分な知識と理解が必要である。ここで、まず粒子の流動状態に主眼を置くと、これに関する研究では肉眼観察や写真撮影によって流動様式をただ定性的に判別したものは数多くあるが¹⁻⁵⁾、きめ細かいものは非常に少ない⁶⁾。そこで本研究では、水平管路による固体粒子の空気輸送において、特に低流速域での輸送実験を行う。この実験結果から低流速域での水平管路内の粒子の流動状態を明らかにする。

2. 実験装置と方法

本研究に使用した実験装置を **Fig.1** に示す。空気源

昭和63年6月16日受付

日本大学理工学部学術講演会にて一部発表(1986年11月, 東京)

* 日本大学理工学部機械工学科

(〒101 千代田区神田駿河台1-8-14)

TEL 03-293-3251 内線365

[†] Dept. of Mech. Engg., College of Science and Technology, Nihon University, 8-14 Kanda Surugadai 1-chome, Chiyoda-ku, Tokyo 101

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus (Unit : mm)

となる機械にはルーツブロワーを用い、吸引輸送方式を採用した。輸送管には内径 40, 50, 60 mm の 3 種類、全長約 11.5 m の透明なアクリル管を使用した。フィーダーは粒子質量流量の定常性を検定したオリフィス型重力フィーダーとし、その出口には粒子流量調整オリフィス(口径: 30, 40, 45, 50, 55, 60 mm)を取り付けた。輸送管の末端には輸送粒子を空気と分離して回収するためのレシーバータンクがある。輸送管内の空気流量の測定には、レシーバータンクの後の管内に取り付けてある検定済みのオリフィスを、またその空気流量を調整するためにルーツブロワーの入口にバイパス弁を設けた。一方定速区間の粒子の流動状態を瞬間撮影するためにカメラとストロボを、また管路に沿う静圧分布を測定するために多管マノメータを用いた。

実験方法はすべて粒子流量を一定に保ち、流速を準限界流速まで減少させる方法をとった。その粒子流量は 0.07 ~ 1.16 kg/s, 流速は 20.0 ~ 8.0 m/s の範囲とした。詳述すれば、粒子流量の調整は粒子流量調整オリフィスの口径を変えることによって行った。粒子はフィーダーから流量調整オリフィスを経て、水平輸送管の上流の地点に供給され、空気の推力によって終速度に到達し、以後等速で輸送される。そして輸送管の末端のレシーバータンクに空気と分離され回収される。粒子流量は一定時間内に輸送される粒子の質量を計量器で計量し、そのときの輸送時間で除すことによって求めた。一方空気流量はオリフィスで測定し、求めた空気流量から流速を算出した。その空気量の調整はバイパス弁の開度を変えて行った。

本実験に用いた粒子は小麦、ポリエチレンペレット

Table 1 Physical properties of the solids conveyed

Solids	Mean particle size d_s [mm]	Particle density ρ_s [kg/m ³]	Particle floating velocity w_{fo} [m/s]	Angle of repose θ_r [deg]
Wheat	3.7	1282	8.3	28
Polyethylene pellet (P. E. P.)	3.0	887	6.6	23
Rape seed	2.0	1040	7.4	31

(以下 P. E. P. と記す)およびなたねの 3 種類で、その物性値を **Table 1** に示す。

3. 実験結果

3.1 粒子の流動様式

Fig. 2 (A), (B) は管径 $D = 50$ mm の水平管路で 粒子流量 M_s を一定 ($M_s = 0.464$ kg/s) に保ち、流速 U を準限界流速 U_c まで減少させていったときの、低速域における定速区間での小麦の流動状態と全圧損 $\Delta p_m / L$ の変化(破線部分は高速域) の一例である。同図中、

Fig. 2 (A) Variation of flow pattern of wheat ($D = 50$ mm, $M_s = 0.464$ kg/s)

Fig. 2 (B) Variation of pressure drop per unit length of wheat ($D = 50$ mm, $M_s = 0.464$ kg/s)

(A)は流動状態の変化、(B)は全圧損の変化で、(A)の(a)~(c)は(B)の点(a)~(c)と対応する。**Fig. 2(B)**で旗印(Γ)を付したデータは、 U_c の状態におけるものである。数多くの粒子の流動様式の写真観察結果より、**Fig. 2(A)**に見られるように大部分の粒子は、あるピッチをもった不定形の砂丘状の団塊をなし、全体として管底を撓動する。しかし小数の粒子は、団塊の上部を飛翔することがわかった。以下この粒子の団塊を団塊粒子、またこのような流動様式を団塊流動と呼ぶ。

3.2 団塊粒子の形態と速度特性

前述のように、低速域での粒子群の流動は、粒子が砂丘状に団塊を作って流動することにより特徴づけられる。そこで、この低速域の流動を取り扱うに際し、流動中の団塊粒子の形態とその速度特性について調べた。

3.2.1 形態

粒子の流動様式の観察結果に基づいて、流動中の団塊粒子の形態をモデル化して**Fig. 3**に示す。ここで団

Fig. 3 Model of geometrical form and representation of each dune conveying

Fig. 4 Relation between geometrical form of dune and superficial air velocity ($D = 50 \text{ mm}$, P.E.P.)

塊の高さを h_c 、長さを l_c 、盛り上り角を θ_c 、およびピッチを l_{cp} とする。そして撮影された写真からこれらの値を測定し、それによって団塊粒子の2次元的形態を表わす。**Fig. 4** は、 $D = 50 \text{ mm}$ の場合の P. E. P. について一定の M_s におけるそれらの測定値と U との関係を示す。いずれもデータの平均値をプロットして結んだ曲線である。なお測定値をプロットしたものは極めて煩雑となるので⁷⁾、ここでは省略する。 h_c は、同図(a)より各 M_s ととも、 U が減少するにしたがって漸次増加している。 l_c もまた、同図(b)より U の減少とともに増加しているが、その増加割合は h_c の場合とやや異なる。 θ_c は、同図(c)より M_s が非常に小さい場合を除いては、 U が減少してもほとんど変化は見られずほぼ一定である。また l_{cp} は、同図(d)より U の減少とともにその変化状況が各 M_s によって異なる。なおその他の粒子(小麦、なたね)ならびにその他の D (40, 60mm) についても、ほぼこれと同じことがいえる。**Fig. 5** は $D = 40, 50, 60 \text{ mm}$ での P. E. P. について、特定の $U (= 11.5 \text{ m/s})$ における団塊粒子の形態と固気流量比 (M_s と空気流量 M との比) m_T との関係を示す。 h_c および l_c は、同図(a)および(b)より各 D ととも、 m_T の増加に伴って増加するが、 $m_T > 10$ ではほぼ

Fig. 5 Relation between geometrical form of dune and solids-gas flow ratios

Fig. 6 Dimensionless height and length of dune

一定となる。またその一定値を D の大小と比較してみると、 D が大きい方がその値は大きい。一方、 θ_c および l_{cp} は、図(c)および(d)より m_T が小さい場合を除いては m_T の影響はほとんどない。しかも D の大小に無関係にそれぞれ一定の固有値をもつ。それらの値の内、 θ_c の値は 23° で円筒による傾斜角法から求めた粒子の安息角 θ_r と一致する。すなわち $\theta_c \cong \theta_r$ と見なすことができる。一方 l_{cp} の値はほぼ $450 \sim 550$ mmの範囲にある。以上のことは、他の粒子(小麦、なたね)についてもほぼ同じ傾向になることを確認した。しかし l_{cp} については粒子によってそれぞれ傾向が異なることがわかった。ところでFig. 5において h_c と l_c は D の影響が見られることから、それらを D で無次元化するとFig. 6のようになる。同図(a')より h_c/D は、 $m_T > 10$ においては 0.6 すなわち $h_c = 0.6D$ となる。他の粒子(小麦、なたね)についてもほぼ同じ値になることを確認した。また同図(b')より l_c/D は、 $m_T > 10$ においては 2 すなわち $l_c = 2D$ となる。しかし他の粒子については若干値が異なり、小麦では $l_c = 3D$ 、なたねは $l_c = 2.5D$ となる。

3.2.2 速度特性

流動中の団塊粒子が一定区間(=2 m)を通過する時間をストップウォッチで測り、それからその速度 U_{pc} を算出した。これはその速度が $1 \sim 3$ m/sといった、極めて小さいために計測可能である。しかしその計測にはかなりの個人誤差が入るので、同一条件で数回の計測を行い、その平均値をとった。いうまでもなく、これは暫定的な測定方法で、定性的に団塊粒子の速度特性を調べたに過ぎない。Fig. 7の(a)は、 $D = 50$ mmにおける小麦とP.E.P.の各 M_s について、上述のようにして求めた U_{pc} と U との関係を示す。図中旗印(r)を付したデータは、 U_c の状態におけるものである。

Fig. 7 Graph relating particle velocity and particle/air velocity ratio of dune to superficial air velocity ($D = 50$ mm)

また同図より U_{pc} と U との比(以下これを ϕ_{pc} と記す)を求め、この ϕ_{pc} と U との関係を示すと同図(b)のようになる。これらの図からわかるように、 U の減少とともに U_{pc} (または ϕ_{pc})は急激に減少し、 U が U_c に達すると U_{pc} (または ϕ_{pc})は非常に小さい値となる。そして U が U_c よりさらに低下すると、直ちに団塊粒子はその運動を停止するので、 $U < U_c$ の流速域での U_{pc} (または ϕ_{pc})の計測は不可能となる。他の管径(40, 60 mm)についても際立った相違は見られず、ほぼ同様な結果となることを確認した。なお辻らの電子的計測による精度の高い測定結果より、比較的固気流量比の小さい場合についても上述のような傾向になることが報告されている⁶⁾。

4. 結 論

固体粒子の管内空気輸送において、輸送エネルギーを節約する見地から低流速域における粒子の流動状態と輸送特性を分析し、把握することは重要である。そこでまず水平管内におけるその流速域での粒子の流動状態を写真撮影により調べた。用いた粒子は小麦、P.E.P.およびなたねの3種類、また管径も40, 50, 60 mmの3種類である。用いた粒子と管径の範囲で得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 粒子群の流動は、粒子が砂丘状に団塊を作って流動することにより特徴づけられる。

(2) 流動中の団塊粒子の高さと長さは、各管径とも、流速と固気流量比に関係する。しかし固気流量比が10以上では、それらは固気流量比に無関係で一定とな

る。その一定値は、管径が大きい方が大きい。一方団塊粒子の盛り上り角とピッチは、固気流量比が小さい場合を除いては固気流量比の影響はほとんどない。しかも管径に無関係にそれぞれ一定の固有値を有する。

(3) 流動中の団塊粒子の速度は、流速の減少とともに急激に減少する。そして流速が準限界流速より少しでも低下すると、直ちに粒子はその運動を停止する。

〔謝 辞〕この一連の報告に対してご丁寧な教示を頂いた谷一郎東京大学名誉教授ならびに蒔田廣之日本大学教授に心からお礼申し上げます。またこの一連の実験を行うに際し、多大な協力を頂いた卒業生諸氏に感謝の意を表します。

Nomenclature

D	: pipe diameter	[mm]	$\Delta p_m/L$	: total pressure drop per unit length	[Pa/m]
d_s	: equivalent diameter of particle	[mm]	U	: superficial air velocity	[m/s]
h_c	: height of dune	[mm]	U_c	: semi-limiting superficial air velocity	[m/s]
L	: length of pipe	[m]	U_{pc}	: velocity of dune	[m/s]
l_c	: length of dune	[mm]	w_{fo}	: terminal settling velocity of particle	[m/s]
l_{cp}	: pitch length of dune	[mm]	θ_c	: angle of slope of dune	[deg]
M	: mass flow rate of air	[kg/s]	θ_r	: angle of repose	[deg]
M_s	: mass flow rate of solids	[kg/s]	ρ_s	: particle density	[kg/m ³]
m_T	: mass flow rate ratio of solids to air = M_s/M	[-]	ϕ_{pc}	: velocity ratio of solids to air of dune = U_{pc}/U	[-]

References

- 1) Uematsu, T. and Kano, T. : *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **28**, 171 (1962)
- 2) Wen, C. Y. and Simons, H. P. : *A. I. Ch. E. J.*, **5**, 263 (1959)
- 3) Krambrock, W. : *Chem. Ing. Tech.*, **54**, 793 (1982)
- 4) Zenz, F. A. and Othmer, D. F. : "Fluidization & Fluid-Particle System", p. 314, Reinhold Publishing Corporation (1960)
- 5) Ochi, M. and Ikemori, K. : *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **43**, 3816 (1977)
- 6) Tsuji Y. and Morikawa, Y., et al. : *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, **48**, 656 (1982)
- 7) Ochi, M. : Dissertation, p. 159, Nihon University (1984)