鉛直管内固気二相旋回流における 粒子の流動特性の研究

Research of Particle Behavior for Gas-Solid Swirling Flow in a Vertical Pipeline

李 輝*, 富田 侑嗣**, 白石 成輝**, 船津 勝也**
Hui LI, Yuji TOMITA, Masateru SHIRAISHI, Katsuya FUNATSU

Measurements of particle velocity and concentration profiles for a swirling gas-solid flow in a vertical pipeline with a height of 12m and an inner diameter of 80mm have been performed by photographic methods. Polyethylene pellets with mean diameter of 3.2mm were used as test particles. The initial swirl numbers were varied from 0.38 to 0.94, the mean air velocities from 9m/s to 25m/s and the solid-gas ratios from 0.2 to 0.7. It was found that in the acceleration region the mean particle velocity for the swirling gas-solid flow was higher than that for the axial gas-solid flow in the lower air velocity range and was lower in the higher air velocity range. Along the axial direction the change of the mean particle velocity for the swirling gas-solid flow was larger than that for the axial gas-solid flow in the acceleration region. With swirling flow, the particle velocity profiles became uniform.

Key Words : Particle Concentration, Gas-Solid Two-Phase Flow, Pipeline, Particle Velocity, Swirling Flow

1. 緒言

著者ら^{1~6)}は水平と鉛直管空気輸送に対して、輸送エネルギーの節約、最適輸送速度の減少、輸送の安定性などという観点から旋回流空気輸送システムを提案した。そして、低速旋回流空気輸送では、圧力損失や閉塞の恐れが減少することを明らかにした。

旋回流空気輸送の応用においては、合理的な旋回流を使用して、輸送エネルギーを減少することが重要である。そのためには、固気二相旋回流の流動機構を十分研究することが必要である。一般に、輸送管内の固体粒子の運動は三次元的であり、旋回流空気輸送では粒子の運動はより複雑になると考えられる。著者ら^{7, 8)}は低濃度の水平管内固気二相旋回流の実験を行い、粒子の速度と濃度分布の特性を調べた。さらに、旋回流中における粒子の運動および旋回流は粒子に影

響されることを調べるため、加速域を含む水平と鉛直管内の三次元固気二相旋回流の数値シミュレーションを行った^{9, 10)}。

本研究では、低濃度の鉛直管内固気二相旋回流の実験を行い、固体粒子の運動軌跡の写真から粒子の速度と濃度分布およびそれらの場所的な変化を供給器から0.7m, 5.7m および 11.7m 下流において測定し、その測定結果を検討し、旋回流空気輸送における粒子の流動特性を調べた。

2. 実験装置および測定方法

本研究に使用した実験装置は、Fig. 1に示す圧送式空気輸送システムを採用した。ブロワー①からの空気は、空気流量調節バルブ②、多孔整流板③、四分円ノズル④を通過した後、旋回流発生器⑥によって（直線流の場合には、旋回流発生器がない）旋回流に変えられて輸送管⑦に入る。粒子は供給器⑨から輸送管内に入る。輸送管は内径 $D=80\text{mm}$ のアクリルパイプから成り、全長約 $H=12\text{m}$ である。被輸送物の供給量はバルブで調節する。輸送管内の空気流量は四分円ノズル（差圧変換器と圧力変換器を使用）で測定し、これから平均空気速度 U_a を算出した。粒子の質量流量 G_s は回収タンク⑩に取り付けられたロードセル⑫に

1999年4月20日受付

* 鹿児島大学工学部

(〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-40) TEL 099-285-8252

Faculty of Engineering, Kagoshima University

(1-21-40, Korimoto, Kagoshima 890-0065)

** 九州工業大学工学部

(〒804-5500 北九州市戸畑区仙水町1-1) TEL 093-884-3157

Kyushu Institute of Technology

(1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyusyu 804-5500)

Fig. 1 Experimental apparatus

よって測定する。なお⑩は回収管である。

旋回流は案内羽根式発生器によって発生させる。旋回流の強さの表示法として前報¹¹⁾と同じく、次式の粒子供給断面のスワール数 S_0 (入口スワール数) を使用する。

$$S_0 = \frac{2\pi\rho \int_0^R uwr^2 dr}{2\pi\rho R \int_0^R u^2 r dr}$$

ここで、 u, w は空気速度の軸および円周方向成分、 R は管半径、 r は半径座標、 ρ は空気密度である。

実験は、旋回流と直線流において、粒子質量流量を $G_s = 0.03 \text{ kg/s}$ に保って行った。粒子速度と濃度分布の測定は、粒子供給点から $x = 0.7 \text{ m}$ 、 $x = 5.7 \text{ m}$ および $x = 11.7 \text{ m}$ 下流の長さ約 250 mm の区間で行った。カメラによって、粒子の流動状態を撮影した。カメラのシャッター速度は 2 ms である。撮影した粒子の流動写真を拡大し、デジタイザーによって各粒子の軌跡を読み、粒子速度を求めた。Fig. 2 のように測定部の領域を 8 分割し、 i 領域の代表粒子速度 u_{pi} は次式で計算した。

Fig. 2 Schematic of measuring domain

$$u_{pi} = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} u_{pij} \quad (1)$$

ここで、 N_i は i 領域に含まれる粒子数、 u_{pij} は i 領域の j 番目粒子の速度である。全領域内の粒子の平均速度 U_p は次式で計算した。

$$U_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^8 N_i} \sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^{N_i} u_{pij} \quad (2)$$

ここで、 $\sum_{i=1}^8 N_i$ は全領域内の粒子数の総和である。

測定区間における各領域の相対粒子濃度分布 ρ_{si}/ρ_{s0} は次式で計算した。

$$\frac{\rho_{si}}{\rho_{s0}} = \left(\frac{A}{a_i} \right) \frac{N_i}{\sum_{i=1}^8 N_i} \quad (3)$$

ここで、 ρ_{s0} は全領域内の粒子の平均濃度、 A は管断面積、 a_i ($i = 1, 2, \dots, 8$) は各領域の断面積である。

なお、写真を細かくみると粒子が重なった場合はほとんどなかった。また、測定区間内での軸方向の粒子

速度変化は無視した。

本研究に用いた固体粒子は、平均粒径 3.2mm、真密度 946kg/m³、浮遊速度 8.44m/s のポリエチレンペレットである。浮遊速度は内径 80mm の鉛直管での実測値である。実験は平均空気速度 U_a が 9~25 m/s の範囲で行った。粒子と空気の質量流量比である混合比 m が 0.2~0.7 である。入口スワール数 S_0 が 0.38, 0.68, 0.94 の 3 種類の案内羽根式旋回流発生器を使用した。

本実験の不確かさ解析は、要素誤差要因として、①圧力と差圧変換器の校正に伴う誤差、②増幅器と A/D 変換ボードによるデータ収集誤差、③デジタイザーとカメラの誤差を考慮して行った。その結果、不確かさは、平均空気速度 U_a では 99% 包括度で 8.9%、粒子速度 u_{pi} では 99% 包括度で 3.32% となった。

3. 実験結果と考察

3.1 全圧損失

直線流との比較のため、前報^{1), 5)}と同様、旋回流発生器による圧力損失を含めた全圧損失 ΔP_t を考える。すなわち、旋回流発生器前の鎮静管と管出口の間をとり、 ΔP_s を鎮静管の壁面静圧として、 ΔP_t は次式で求めた。

$$\Delta P_t = \Delta P_s + \frac{1}{2} \rho [(D/D_0)^4 - 1] U_a^2 \quad (4)$$

ここで、 D_0 は鎮静管直径で 156mm、 D は輸送管直径で 80mm である。

Fig. 3 に、 $G_s = 0.03\text{kg/s}$ について全圧損失 ΔP_t と平均空気速度 U_a の関係を入口スワール数 S_0 をパラ

Fig. 3 Total pressure drop ($G_s = 0.03\text{kg/s}$)

Fig. 4 Flow patterns of axial gas-solid flow ($U_a = 10\text{m/s}$, $G_s = 0.03\text{kg/s}$, $S_0 = 0.0$)

Fig. 5 Flow patterns of swirling gas-solid flow ($U_a = 10\text{m/s}$, $G_s = 0.03\text{kg/s}$, $S_0 = 0.68$)

メータとして示す。図から、高速域では、旋回流空気輸送の全圧損失は大きい、 U_a の減少に伴い急減し、ある空気速度で最小値をもつことがわかる。一般に、直線流空気輸送では ΔP_t の最小値の空気速度（以下最適速度と呼ぶ）は安全輸送速度と考えられ、輸送エネルギーの節約、管路の摩耗および被輸送物の破砕の減少という観点から重要な風速である。Fig. 3 から $G_s = 0.03\text{kg/s}$ の場合、旋回流の最適速度は直線流より小さく、旋回流が強いほど最適速度は小さくなる傾向が見られる。

3.2 粒子の流動状態

Fig. 4 と Fig. 5 は、供給器よりそれぞれ 0.7m、5.7 m および 11.7m での、直線流 ($S_0 = 0.0$) と旋回流 ($S_0 = 0.68$) における粒子の運動軌跡の写真を示す。

(a) at $x=0.7\text{m}$

(b) at $x=5.7\text{m}$

(c) at $x=11.7\text{m}$

Fig. 6 Cross-sectional distribution of particle velocity

Fig. 4から、0.7mでの粒子運動は、直線流ではほぼ管軸に平行であるが、旋回流では、粒子は周方向に旋回させられながら流動していることがわかる。旋回流ではさらに、低速域のとき高濃度の管壁流状態が現れている。5.7mでは旋回流の周方向成分が減衰するため、粒子の旋回状態は弱くなっている。供給器より11.7m下流では旋回流の周方向成分は更に弱くなり、粒子の運動状態は直線流とほぼ同じになる。

3.3 管断面の粒子の速度分布と濃度分布

Fig. 6およびFig. 7は各測定位置 $x=0.7\text{m}$, 5.7m および 11.7m における $U_a=10\text{m/s}$ での旋回流および直線流について、管断面の粒子の速度と濃度分布を比較したものである。鉛直管ではほぼ軸対称が成り立っていると考えられる。Fig. 6のまとめ方では、左右端

(a) at $x=0.7\text{m}$

(b) at $x=5.7\text{m}$

(c) at $x=11.7\text{m}$

Fig. 7 Cross-sectional distribution of particle concentration

はほぼ管壁近傍に対応し、中心に向かうにつれ、各半径位置の粒子速度を平均していることになる。Fig. 6から粒子速度分布に関しては、場所および旋回の強さに関係なく、ほぼ均一な分布であるといえる。Fig. 7より濃度分布は旋回流と直線流とも管壁付近で高くなっていることがわかる。この傾向は旋回流で強いと見られる。 $x=5.7\text{m}$ で旋回流は片側に高濃度の分布が現れる。これは粒子が壁面を旋回しながら輸送されていることを示す。

3.4 管断面の平均粒子速度

Fig. 8に、粒子供給部から0.7m, 5.7mおよび11.7mの位置における断面平均粒子速度 U_p と平均空気速度 U_a の関係を入力スワール数をパラメータとして示す。

Fig. 8 Mean particle velocity versus mean gas velocity

$x=0.7\text{m}$ (Fig. 8 (a)) では、高速域で各旋回流と直線流の U_p はほぼ同じであるが、 U_a を下げていくと旋回流の U_p の方が小さくなり、 $U_a=16\text{m/s}$ 付近でそ

Fig. 9 Axial distribution of mean velocity ratio

の差は最大となる。さらに U_a を減少するとその差は小さくなり、 $U_a=9\text{m/s}$ 付近で旋回流と直線流の U_p はほぼ同じとなる。閉塞速度の実験結果^{1, 5)} から、これ以下の速度では旋回流の U_p は直線流のものより大きくなることと予想される。

$x=5.7\text{m}$ においては、高速域では旋回流の U_p は直線流よりかなり小さいが、 U_a を下げると、その差は減少し、 $U_a=12\text{m/s}$ 以下で旋回流の U_p は逆に大きくなる。

さらに、下流 ($x=11.7\text{m}$) でもやはり高速域では依然として直線流の U_p はかなり高いが、 U_a の減少によりその差は小さくなる。低速 ($U_a<16\text{m/s}$) では強い旋回流 ($S_0=0.94$) の U_p は直線流より大きくなっていることがわかる。

以上より、 U_a が大きいとき旋回の影響はかなり下流まで残っており、一方、 U_a が小さいとき下流では旋回流の U_p は直線流より大きく加速性がよいことがわかる。このことは、旋回流が直線流より低速で輸送できることを裏づけている。

Fig. 9 は $U_a=18\text{m/s}$ 、 12m/s および 9m/s について、管軸に沿う平均粒子速度比 $\phi(\phi=U_p/U_a)$ の変化を、入口スワール数をパラメータとして示したものである。 $U_a=18\text{m/s}$ (**Fig. 9 (a)**) では、 ϕ は下流に向かって旋回流、直線流とも増加していることがわかる。旋回流では粒子は周方向に旋回させられながら流動しているため、全体的に直線流の ϕ は大きくなっている。加速域で強い旋回流 ($S_0=0.94$) の ϕ は小さいが、出口付近では逆にほかの旋回流より高くなっている。他方、直線流では ϕ の増加率は加速域で大きく、下流で小さくなる傾向がみられる。

$U_a=12\text{m/s}$ では、**Fig. 9 (b)** のように、 $x=0.7\text{m}$ と $x=5.7\text{m}$ の間で旋回流の ϕ の増加率は直線流より大きくなっている。 $x=0.7\text{m}$ 付近で旋回流の ϕ は直線流より小さいが、 $x=6\text{m}$ 付近で旋回流 ($S_0=0.68$ と $S_0=0.38$) の ϕ は逆に高くなっている。出口付近では強い旋回流 ($S_0=0.94$) も直線流より高くなり、 ϕ は旋回が強いほど大きいことがわかる。旋回流

$S_0=0.38$ の ϕ は下流で減少する傾向が現れる。

U_a が 9m/s に下がると (**Fig. 9 (c)**)、旋回流の加速は全体的に大きく、 $x\geq 3\text{m}$ では旋回流の ϕ は直線流より高くなっている。下流で ($x>6\text{m}$) 旋回流 ($S_0=0.68$ と $S_0=0.38$) の ϕ の増加率は減少する傾向がみられる。

以上より、旋回流では空気速度が減少すると、粒子の加速域は短くなることがわかる。本実験の範囲では、旋回流が弱いほど加速域が短くなる傾向にあったが、極めて旋回が弱い場合には加速域も直線流の場合に近づくことと予測でき、旋回流 ($S_0=0.38$) より弱いある場合において加速域は最小になると考えられる。このように、直線流と比べて低速になるほど旋回流の粒子加速域は短くなるが、その間の ϕ の増加率は直線流よりはるかに大きく、結果として旋回流の閉塞速度は減少することと考えられる。

4. 結 論

低濃度鉛直管内旋回流空気輸送の実験を行い、粒子供給点から 0.7m 、 5.7m および 11.7m の3点で粒子速度と濃度分布を測定し、直線流と比較して以下の結論を得た。

- (1) 空気速度が大きな場合には、旋回流では直線流に比べて粒子の加速は抑制されるが、空気速度が小さな場合には、旋回流により粒子の加速は促進され、加速に要する距離が短縮される。
- (2) 本実験の範囲では、旋回流が弱いほど粒子の加速域が短くなる傾向がみられる。
- (3) 旋回流の粒子の断面速度分布はほぼ均一で、濃度分布については管壁付近で高くなる。

終りに、実験にご協力頂いた九州工業大学の卒研究生の立石克彦および堤谷睦夫の両君に謝意を表す。

References

- 1) Li, H., Y. Tomita and K. Funatsu: "Research of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Horizontal Pipeline (1st, Report, Pressure Drop and Flow Patterns)", *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **58 (B)**, 1599-1604 (1992)
- 2) Li, H. and Y. Tomita: "Research of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Horizontal Pipeline (3rd Report, Coefficients of Power Consumption and Additional Pressure Drop)", *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **59 (B)**, 756-761 (1993)
- 3) Li, H., Y. Tomita and K. Funatsu: "Research of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Vertical Pipeline (Coefficients of Power Consumption and Additional Pressure Drop)", *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **60 (B)**, 802-806 (1994)
- 4) Li, H., Y. Tomita and K. Funatsu: "Research of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Vertical Pipeline (Overall Pressure Drop and Flow Patterns)", *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **60 (B)**, 1263-1268 (1994)
- 5) Li, H. and Y. Tomita: "An Experimental Study of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Horizontal Pipeline", *ASME Journal of Fluids Engineering*, **118**, 526-530 (1996)

- 6) Li, H. and Y. Tomita : "An Experimental Study of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Vertical Pipeline", *ASME Journal of Fluids Engineering*, **120**, 200-203 (1998)
- 7) Li, H. and Y. Tomita : "Research of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Horizontal Pipeline (2nd, Report, Particle Velocity and Concentration Profiles)", *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **59 (B)**, 411-418 (1993)
- 8) Li, H. and Y. Tomita : "Particle Velocity and Concentration Characteristics in a Horizontal Dilute Swirling Flow Pneumatic Conveying", *Powder Technology* (in press).
- 9) Li, H. and Y. Tomita : "A Numerical Simulation of Swirling Flow Pneumatic Conveying in a Horizontal Pipeline", *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **60 (B)**, 2431-2438 (1994)
- 10) Li, H. and Y. Tomita : "Numerical Simulation of Swirling Gas-Solid Two-Phase Flow in a Vertical Pipeline", *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **62 (B)**, 3810-3817 (1996)
- 11) Li, H. and Y. Tomita : "Characteristics of Swirling Flow in a Circular Pipe", *ASME Journal of Fluids Engineering*, **116**, 370-373 (1994)