鉛直管粒体プラグ輸送の粒子流動を考慮した 粒子速度と圧力損失予測式の提案

Proposal on Prediction Equations of Particle Velocity and Pressure Drop Considered the Flow Pattern on Granular Particles Plug Transportation in Vertical Pipe

河府 賢治, 越智 光昭, 武居 昌宏

Kenji Kofu, Mitsuaki Ochi, Masahiro Takei

Received 12 April 2007 ; Accepted 20 July 2007

For a plug transportation in gas-solid two-phase flow, the prediction equations on particle velocity in a plug and pressure drop in a vertical pipe were formulated by considering fluidized particles. These equations well predicted the experimental data obtained with various solid-air mass flow rates, pipe diameters, and types of particles with the error within around 10%.

In order to confirm the validity of the suppositions introduced in deriving these equations, the particle velocity distributions within a plug in the axial and transversal directions of flow were analyzed by a high speed camera and PIV. As a result, there was very little distribution in particle velocity in a plug, indicating that the particles in a plug are fixed relative to each other and therefore they all move with the same velocity.

Keywords : Pressure drop, Particle velocity, Plug transportation, Plug velocity, PIV

1. 緒 言

粉粒体輸送方式の一つである空気輸送は、ベルトコンベア等の機械的輸送方式、あるいは、コンテナなどの容器を用いた輸送方式と比べ、高速、且つ衛生的に輸送でき、また、人件費最小で稼働できるなど多くの長所を持つ。この空気輸送は、低濃度高速輸送方式と高濃度低速輸送方式の二つに大別できる。最近では、省エネルギー、管路の摩耗や粒子の破損防止の観点から、高濃度低速輸送方式、通称プラグ輸送の採用が著しい。

このプラグ輸送ラインの設計において、輸送コストの低減化や輸送の確実性の観点から、正確に所要動力、すなわち、圧力損失を見積もる必要がある。そのため、これまで多く研究者により研究され、圧力損失

予測式が導かれている¹⁻⁵⁾。しかしながら、これらの式は主として水平管に対する式であり、鉛直管に対する式はほとんど報告されていない。辻³⁾やHong⁶⁾らにより鉛直管プラグ輸送における圧力損失予測式が導かれているが、プラグを剛体として扱っている。鉛直管におけるプラグ輸送は、プラグ後端において粒子がプラグ内から外に吐き出され、下方に落下し、その落下粒子を次のプラグが前端においてプラグ内に取り込んでいる⁷⁻⁹⁾。水平管においても同様の粒子流動があり、圧力損失予測式導出において、この粒子流動が圧力損失へ影響することが考えられている¹⁻⁴⁾。そのため、鉛直管においても粒子流動による圧力損失への影響を考える必要があり、つまり、プラグを剛体として扱うことはできないと言える。しかし、この粒子流動を考慮した鉛直管プラグ輸送における圧力損失予測式は導かれていない。

また、プラグ速度とプラグ内粒子速度との関係において、水平管に対しては辻³⁾によりBrooke Benjaminの気液二相流理論¹⁰⁾の適用性が報告されているが、鉛直管に対しては報告されていない。

さらに、圧力損失予測式導出において、辻³⁾は

日本大学 理工学部 機械工学科
(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14)
TEL 03-3259-0755
Department of Mechanical Engineering, College of Science & Technology, Nihon University
(1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308, Japan)

Fig. 1 Pressure within a plug in vertical pipe

Ergun 式¹¹⁾を用いている。しかし、この Ergun 式は管内径および粒子形状の相違により誤差が生じることが知られている^{12, 13)}。そのため辻らの式は、管内径および粒子形状に対し、検討の余地があると言える。著者らは、静止粒子充填層内圧力損失予測式として、管内径および粒子形状を考慮した修正 Ergun 式を提案した¹⁴⁾。この式は、管内径、粒子形状および空気速度に対し適用範囲が広く、さらに、実値との誤差が $\pm 6\%$ と精度も高い。しかし、この式を単独でプラグ輸送へ適用するためには、粒子速度が必要となり、プラグ輸送ライン設計に用いることは難しい。

そこで、本研究では、鉛直管プラグ輸送における粒子流動を調べ、この粒子流動と修正 Ergun 式を用い、粒子種類、管内径および輸送条件に対し応用性が高い実用的な圧力損失予測式を導出することを目的とした。

2. 予測式の導出

Fig. 1 に、鉛直管における輸送安定状態のプラグを示す。輸送安定状態のプラグ輸送では、プラグ後端において粒子をプラグ外へ吐き出し落下させ、プラグ前端において落下粒子をプラグ内に取り込む粒子流動がある。粒子群が管断面全体を塞いでいる部分の長さを、プラグ長さ l_p とする。 l_p の範囲内において、長さ dy の微小部分に作用する力の釣合いを考える。 l_p 内の粒子は相互に固定された状態、つまり一塊で輸送されるとし、 y だけの関数として全応力を仮定すると、

$$\frac{dP}{dy} + \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{4\tau_w}{D} + \rho_B g = 0 \quad (1)$$

Fig. 2 Mohr's circle diagram for a cohesive Coulomb material with passive failure at the wall

となる。ここで σ_y は流れ方向の粒子相互応力、 P は空気圧力、 τ_w は壁面摩擦応力、 D は管内径、 ρ_B はかさ密度、および g は重力加速度である。半径方向の粒子相互の応力 σ_r に関し、 $\sigma_r > \sigma$ となる受動的崩壊に対し Konrad¹¹⁾ は、Fig. 2 に示すモール応力円を導き、

$$\sigma_r = K_w \sigma_y + (K_w + 1) c \cos \phi \cos(\omega + \phi_w) \quad (2)$$

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

$$\sin \omega = \frac{\sin \phi_w}{\sin \phi} \quad (4)$$

$$\tan \phi_w = \mu_w \quad (5)$$

を得た。ここで、 μ_w は摩擦係数、 ϕ は内部摩擦角、 c は粒子同士の粘着力、 ω は Fig. 2 中の図示角度、 ϕ_w は壁面摩擦角である。Eqs. (1), (2) およびクーロンの法則を用い、プラグ内の圧力損失が一定として σ_y について積分することにより、Konrad¹¹⁾ は

$$\begin{aligned} \sigma_y = & k \exp \left[-\frac{4\mu_w K_w}{D} y \right] \\ & + \left(-\rho_B g + \frac{\Delta P}{l_p} \right) \frac{D}{4\mu_w K_w} \\ & - \frac{(K_w + 1) c \cos \phi \cos(\omega + \phi_w)}{K_w} - \frac{C_w}{\mu_w K_w} \end{aligned} \quad (6)$$

を導いた。ここで C_w は管壁と粒子との粘着力、 k は積分定数、 ΔP はプラグ前後の圧力差である。 k をプラグ前後端の境界条件より求める。辻および Hong はプラグを剛体として扱い、 $y=0$ および l_p において $\sigma_y=0$ としている。ところが、粒子流動があるため、プラグは剛体ではなく、 $\sigma_y=0$ とおくことは難しいと

言える。そこで本研究では、Janssen の解析¹⁵⁾ より、プラグ前後端の応力は等しいと考えることができるため、 $y=0$ および l_p において $\sigma_y=F$ とする。これより、Eq. (6) は

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{l_p} = & \rho_B g + \frac{4\mu_w K_w F}{D} \\ & + \frac{4\mu_w (K_w + 1) c \cos \phi \cos(\omega + \phi_w)}{D} \\ & + \frac{4C_w}{D} \end{aligned} \quad (7)$$

となる。非粘着性粒子を考えると

$$C_w = c = 0 \quad (8)$$

となり、Eqs. (7) および (8) より

$$\frac{\Delta P}{l_p} = \rho_B g + \frac{4\mu_w K_w F}{D} \quad (9)$$

となる。Eq. (9) 中のプラグ前端応力 F を、プラグ前端における運動量の釣り合いより求める。気液二相流の研究において、水平管内を空気の流れであるスラグが進行する速度は $0.542\sqrt{gD}$ となることが、Brooke Benjamin¹⁰⁾ により示されている。また鉛直管に対し、粘性のない液体中のスラグ上昇速度は $0.35\sqrt{gD}$ となることが、Davidson and Harrison¹⁶⁾、Singh¹⁷⁾ および Baker¹⁸⁾ らにより示されている。この鉛直管における気液二相流の研究結果を、水平管同様^{1~4)}、プラグ形状の動く速度であるプラグ速度 W_p とプラグ内の粒子速度 u_s との関係に適用すると

$$W_p = u_s + 0.35\sqrt{gD} \quad (10)$$

となる。Fig. 3 に示すとおり、 W_p の座標系で考えると、プラグ前端でプラグ内に取り込まれ、そしてプラグ後端でプラグ外に吐き出される粒子の質量流量 G_s は

$$G_s = \rho_B A (W_p - u_s) \quad (11)$$

となる。プラグ前端の運動量より

$$AF = G_s W_p - G_s (W_p - u_s) = G_s u_s \quad (12)$$

となる。故に Eqs. (10), (11) および (12) から

$$F = 0.35\rho_B u_s \sqrt{gD} \quad (13)$$

となる。辻および Hong は、プラグを剛体として扱っているため $F=0$ となり、この粒子流動による圧力損

Fig. 3 Particle velocity (plug velocity axis)

失を考慮していない点が著者らの式と異なる。Eq. (13) を、Eq. (9) に代入すると

$$\frac{\Delta P}{l_p} = \rho_B g + 1.4\mu_w K_w \rho_B u_s \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (14)$$

となる。

また、静止粒子充填層内の圧力損失に関して Ergun 式¹¹⁾ が知られている。しかし、この Ergun 式による圧力損失は、 D および粒子形状により誤差が生じることが知られている^{12, 13)}。そのため著者らは、 D および粒子形状を考慮した修正 Ergun 式¹⁴⁾

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{l_p} = & 150 \left(1 + \frac{2d_p (1 - 0.645\phi_s)}{3D(1-\varepsilon)} \right)^2 \\ & \times \frac{\eta(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \{(1 - 0.645\phi_s)d_p\}^2} U_{SP} \\ & + 1.75 \frac{\rho_a(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 (1 - 0.645\phi_s)d_p} U_{SP}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

を提案した。 η は空気粘度、 d_p は粒子径、 ρ_a は空気密度、 ε は空隙率 ($=1 - \rho_B/\rho_s$)、 U_{SP} はすべり速度、 ϕ_s は粒子直線率である。ここで、 U_{SP} を空気速度 U_a を用い

$$U_{SP} = U_a - u_s \quad (16)$$

とする。Eqs. (14), (15) および (16) から、 u_s について整理すると

$$u_s^2 - \left(2U_a + \frac{a}{b\rho_a} + \frac{1.4\mu_w K_w \rho_B}{b\rho_a} \sqrt{\frac{g}{D}} \right) u_s + \left(\frac{aU_a}{b\rho_a} + U_a^2 - \frac{\rho_B g}{b\rho_a} \right) = 0 \quad (17)$$

となる。ここで

$$a = 150 \left(1 + \frac{2d_p(1-0.645\phi_s)}{3D(1-\varepsilon)} \right)^2 \times \frac{\eta(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3[(1-0.645\phi_s)d_p]^2} \quad (18)$$

$$b = 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3(1-0.645\phi_s)d_p} \quad (19)$$

である。解の公式より u_s を求めることができる。この時、 u_s に関して二つの解が求められるが、大きい方の値は負のすべり速度を与えるため、小さい方の値を真の u_s とする。すなわち

$$u_s = \frac{1}{2} \left[2U_a + \frac{a}{b\rho_a} + \frac{1.4\mu_w K_w \rho_B}{b\rho_a} \sqrt{\frac{g}{D}} - \sqrt{\left(2U_a + \frac{a}{b\rho_a} + \frac{1.4\mu_w K_w \rho_B}{b\rho_a} \sqrt{\frac{g}{D}} \right)^2 - 4 \left(\frac{aU_a}{b\rho_a} + U_a^2 - \frac{\rho_B g}{b\rho_a} \right)} \right] \quad (20)$$

となる。辻らが提案した式は、この u_s の式の導出過程において、粒子形状および D を考慮していない Ergun 式を用いている点が著者らの式と異なる。

Eq. (20) より得られる u_s を Eq. (14) へ代入することにより、プラグ内の圧力損失が得られる。しかし、鉛直管全長にわたる圧力損失を求めるためには、プラグ内の圧力損失を表している Eq. (14) を、空気のか塊である空気スラグ部も含めた鉛直管全体の式に拡張しなければならない。粒子輸送量 M_s 、管内に存在するプラグの総長さ L_P 、および管長 L_T の関係に関し

$$L_P = \frac{M_s L_T}{A \rho_B u_s} \quad (21)$$

と表している³⁾。空気スラグ部の圧力損失はプラグ部と比べ非常に小さいため無視し、Eq. (14) の l_p を L_P に置き換え、Eq. (21) を Eq. (14) に代入すると

$$\frac{\Delta P}{L_T} = \frac{M_s}{A \rho_B u_s} \left[\rho_B g + 1.4\mu_w K_w \rho_B u_s \sqrt{\frac{g}{D}} \right] \quad (22)$$

Fig. 4 Experimental apparatus (units in mm)

となる。Eq. (22) より鉛直管全体の圧力損失を求めることができる。

3. 実験装置、条件および方法

Fig. 4 に、本研究に用いた実験装置を示す。輸送管は $D=38.0$ および 50.0mm の2種類である。また、ライン全長は約 13m であり、全て透明なアクリル管である。空気源にエアーコンプレッサを、その圧縮空気を溜めるためにエアーチャンバを使用し、その圧縮空気を減圧するためにエアーチャンバの後に減圧弁を取り付けた。その後方に、空気流量 Q_a 測定のために、フローメータを設置し、 M_s 測定のために、ブロータンクにロードセルを取り付けた。また、Fig. 4 に示すとおり、鉛直管の2ヶ所に圧力センサを設置し、圧力を測定した。プラグ輸送安定時において、 0.05s ごと 30s 連続測定したときの平均値を管内圧力 P とした。減圧弁と粒子供給弁で安定状態となる輸送条件を設定し、実験を行った。輸送条件は、 $U_a=1.26\sim 5.51\text{m/s}$ 、固気質量流量比 $m_T=21\sim 105$ である。

また、圧力損失予測式で仮定されているプラグ内の主流および半径方向位置による粒子速度分布を調べるため、高速度カメラと PIV を用いた。高速度カメラによる撮影は、 1024×1024 pixels, 2000fps にて行った。PIV の検査領域は 60×60 pixel とし、相関係数は 0.7 とし解析を行った。解像度は、1 画素 0.054mm である。なお、プラグ内の粒子は撮影画像より回転が無いため、回転による PIV の結果への影響は無いと言える。さらに、PIV による粒子速度の値の妥当性を確認するため、および u_s と W_p に関する実験値を測定するため、 30fps のデジタルビデオカメラを用いた。デジタルビデオカメラによる u_s 測定のため、一部の粒子を着色した。Fig. 5 に示す通り、着色された粒子を見つけ、そこから幾つかフレームを進め、その移動距離とフレーム数から u_s を求めた。

Table 1 Particle properties

Solids	Polystyrol pellet	Polyethylene pellet	Nipolon hard	Plastic pellet
Mean particle diameter d_p (mm)	2.80	3.27	3.54	6.00
Straight length ratio ϕ_s (-)	0.369	0.184	0.132	0.000
Voidage ε (-)	0.383	0.378	0.416	0.461
Bulk density ρ_B (kg/m ³)	678	591	531	572
Particle density ρ_S (kg/m ³)	1100	950	910	1061
Angle of internal friction ϕ (deg)	35.4	27.0	30.7	30.0
Coefficient of friction μ_w^* (-)	0.439	0.360	0.288	0.250
Shape	Column	Disk	Oval	Sphere

* Against polyacrylic plate

Fig. 5 Particle velocity in a plug

高速度カメラおよびデジタルビデオカメラを Fig. 4 の破線部に設置した。デジタルビデオカメラによる測定は全条件、高速度カメラおよびPIVによる測定は、代表として $D=38.0$ および 50.0mm におけるポリエチレンペレット、および $D=38.0\text{mm}$ におけるプラスチックペレットにて行った。管中心軸に対し、対称で力が作用すると考えられるため、管断面半分のみ PIV による測定を行った。

実験に用いた粒子は、前出のポリエチレンペレットおよびプラスチックペレットと、それ以外のポリスチ

Fig. 6 Velocity vector in a plug
(Plastic pellet, $D=38.0\text{mm}$, $U_a=2.45\text{m/s}$)

ロールペレットおよびニポロンハードであり、物性値を **Table 1** に示す。

4. 実験結果

PIV によるプラグ内粒子速度ベクトルを **Fig. 6** に示す。管を外側から見たときの管中心軸を 0 とし、主流方向と直角となる水平方向の軸を x 軸とする。PIV による値は、50 フレーム間の平均値である。この

Fig. 7 Confirmation on validity of PIV

Fig. 6 より、速度ベクトルは全て流れ方向のみを向いていること、および、ベクトルの大きさは断面位置にかかわらずほぼ等しいことが分かる。

また、この PIV による u_s の妥当性について調べる。主流方向の u_s に関し、横軸にビデオカメラによる値、縦軸に高速度カメラと PIV による値をとり、Fig. 7 に示す。ビデオカメラによる u_s は、 l_p 内においてランダムに測定された 100 粒の粒子の平均値とした。PIV による u_s は、 $30\text{ mm} \times D/2$ の範囲内における 50 フレーム間およびプラグ 5 個の平均値とした。Fig. 7 から、ビデオカメラによる測定値と PIV による値とが近くなることが分かる。この結果、および、解析において誤ベクトルがほとんど見られなかったことから、PIV による値は妥当であると言える。

さらに、管壁面における水平方向位置に対する粒子速度分布を調べるため、横軸に $x/(D/2)$ をとり、縦軸に PIV による主流方向粒子速度をとり、Fig. 8 に示す。Fig. 8 より x 方向位置にかかわらず、ほぼ同じ速度となることが分かる。PIV による測定は、管壁近傍における粒子速度である。しかし、もし断面内において速度分布がある場合、接する粒子同士の速度差

Fig. 8 Particle velocity distribution in a plug

Fig. 9 Particle velocity variation in a plug

より粒子に回転が起これと考えられるが、本実験において壁面付近の粒子は全く回転していないことが分かる。また速度分布がある場合、断面位置により粒子の落下量に差があると考えられるが、管断面においてほぼ一様に起きていると撮影画像から判断できる。以上のことから、管断面位置にかかわらず一様の速度で粒子は動くと言量できるものと言える。

また、プラグ内の主流方向位置と PIV による主流方向粒子速度との関係を Fig. 9 に示す。粒子速度は、 $x=0$ の各検査領域における 50 フレーム間の平均値とした。Fig. 9 から、流れ方向位置による粒子速度の変化がないことが分かる。以上の結果から、プラグ内の粒子は相互に固定され、ほぼ一塊の状態で輸送されていると言える。

さらに、Davidson and Harrison らによる気液二相流理論の鉛直管プラグ輸送への適用性を調べる。横

Fig. 10 Particle velocity versus plug velocity

Fig. 11 Comparison of experiment with calculation (Tsuji)

軸に u_s をとり、縦軸に W_p をとり Fig. 10 に示す。 u_s はビデオカメラにより測定された100粒の粒子の平均値、 W_p はビデオカメラにより測定された50個のプラグの平均値である。Fig. 10 に実験値をプロットにて、Eq. (10) による計算値を線にて示す。Fig. 10 から実験値と計算値が同様の傾向を示していることが分かる。この結果、プラグ輸送におけるプラグ速度とプラグ内粒子速度との関係に、水平管同様³⁾、気液二相流理論を適用できると言える。

5. 圧力損失予測式の検討

プラグ内粒子速度、および圧力損失に関する予測式の実用性を検討する。横軸に U_a をとり、縦軸に予測値と実験値との比をとり、Figs. 11~13 に示す。 u_s に関する比を α 、 $\Delta P/L_T$ に関する比を β とする。この

Fig. 12 Comparison of experiment with calculation (Hong)

Fig. 13 Comparison of experiment with calculation (This study)

計算において著者らの予測式以外に、辻が提案した式、および Hong が提案した式による計算も行い、図に示す。なお、Hong は u_s について予測式を示していないため、Fig. 12 では u_s に関する予測値と実験値との比較を行わず、さらに $\Delta P/L_T$ の計算で必要となる u_s に実験値を用いた。 u_s の実験値は、プラグ内位置において分布がないこと、および、より多くのプラグにおける値を用いるためデジタルビデオカメラによる値を用いる。

辻の式による計算結果を示す Fig. 11 から、 α は全条件で 1.0 より大きくなること、および β は全条件で 0.5 以下となることが分かる。また、Hong の式による計算結果を示す Fig. 12 から、全条件において β は 0.5 以下となることが分かる。さらに、 U_a が大きくなるほど、辻の式において α が大きく β が小さくなり、Hong の式において β が小さくなることが分かる。すなわち、 u_s および $\Delta P/L_T$ の誤差が大きくなることが分かる。しかし、著者らの式による計算結果を示す Fig. 13 から、 α および β は、粒子の種類、管内径および空気速度などの輸送条件にかかわらず、ほぼ 0.90 から 1.10 の範囲内に収まることが分かる。故に、著者らの式は、実験値に対し $\pm 10\%$ の誤差範囲内に収まると言える。これは、辻および Hong らの式において考慮されていない粒子流動による影響と考えられる。すなわち、 u_s が大きい場合、単位時間あたりにプラグ内に取り込まれプラグ外へ吐き出される粒子質量流量は大きくなる。これにより、壁面への応

Fig. 14 Pressure drop versus particle velocity

力が大きくなり、圧力損失が大きくなるため、粒子流動による圧力損失を考慮する必要があると言える。本研究における式は、辻および Hong の式と異なり、この粒子流動を考慮したため、空気速度にかかわらず実験値と良い合致性を示したと考えられる。さらに、この予測式の精度向上の要因として、粒子形状および管内径を考慮した修正 Ergun 式の導入も考えられる。Ergun の式では、粒子形状により充填層圧力損失予測値と実験値との誤差が生じることが、多くの研究者により報告されている。そのため、Ergun 式を導入した u_s の式においては、大きな誤差が生じると考えられる。ところが、本研究による u_s の式の場合、従来の Ergun 式と比べて精度が高く、さらに適用範囲の広い修正 Ergun 式を用いているため、実験条件にかかわらず精度良く u_s が得られ、 $\Delta P/L_T$ も精度良く得ることができたと考えられる。この結果から、著者らの u_s および $\Delta P/L_T$ の予測式は応用性が高いと言える。

本研究における圧力損失予測式の妥当性をさらに確認する。Eq. (22) を Eq. (21) で除し、

$$\frac{\Delta P}{L_P} = \rho_B g + 1.4 \mu_w K_W \rho_B u_s \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (23)$$

を得る。Eq. (23) 右辺の u_s 以外の各値は、粒子物性および管内径により決まる定数である。そのため、 $\Delta P/L_P$ は u_s に関する一次関数となる。そこで、横軸に u_s をとり、縦軸に $\Delta P/L_P$ をとり、Fig. 14 に Eq.

(23) により計算される予測線を示す。また、実験値 ΔP を Eq. (21) で除して得た $\Delta P/L_P$ をプロットにて Fig. 14 に示す。なお、Eq. (21) の u_s は実験値を用いた。Eq. (23) の右辺第一項は重力による損失、第二項は粒子流動による損失を表している。故に、Fig. 14 における予測線の y 切片は重力による損失、傾きは粒子流動による損失を表す。Fig. 14 において、Eq. (23) による計算値と実験値とが一致することから、著者らの式は重力および粒子流動による損失をそれぞれ適切に見積もっていると言える。

6. 結 論

本報では、鉛直管内における粒体プラグ輸送に関し、プラグ内粒子の流動状態と輸送特性について分析した。実験に用いた粒子は、ポリスチロールペレット、ポリエチレンペレット、ニポロンハードおよびプラスチックペレットである。管内径は、38.0 および 50.0mm、管長（輸送距離）は約 13m でアクリル透明管である。また、輸送条件は空気速度が 1.26～5.51m/s、固気質量流量比は 21～105 である。その結果、以下の結論を得た。

- 1) PIV による粒子速度の測定結果から、鉛直管プラグ輸送の管壁における粒子速度は、主流および主流と直角方向に対し一様であると言える。この結果およびビデオカメラにより粒子が回転していないこと、断面位置による落下粒子量の相違が小さいと判断できることから、プラグ内の粒子は一様の速度で輸送されていると推量できる。
- 2) Davidson and Harrison らの気液二相流理論は、鉛直管プラグ輸送におけるプラグ速度とプラグ内粒子速度との関係に適用できる。
- 3) PIV およびビデオカメラにより確認された粒子流動、および修正 Ergun 式 Eq. (15) を導入し求めた本研究によるプラグ内粒子速度式 Eq. (20)、および圧力損失予測式 Eq. (22) は、粒子種類、管内径および輸送条件にかかわらず、実験値に対し ± 10 % の誤差範囲内に収まる。

Nomenclature

A : pipe cross-sectional area	(m ²)	D : pipe diameter	(m)
a : constant defined by Eq. (18)	(Pa · s/m ²)	F : stress at the front end of a plug	(Pa)
b : constant defined by Eq. (19)	(1/m)	g : acceleration due to gravity	(m/s ²)
d_p : particle diameter	(m)	G_s : mass flow rate of fluid particles	(kg/s)
c : interparticle cohesion	(Pa)	K_W : coefficient of friction at the wall	(-)
C_w : particle-wall cohesion	(Pa)	k : integration constant	(Pa)

l_p : plug length	(m)	η : viscosity of air	(Pa · s)
L_p : total plug length	(m)	μ_w : coefficient of wall friction	(-)
L_T : total pipe length	(m)	ρ_a : air density	(kg/m ³)
M_s : mass flow rate of particles	(kg/s)	ρ_B : bulk density	(kg/m ³)
P : pressure	(Pa)	σ_r : stress in radius direction	(Pa)
W_p : plug velocity	(m/s)	σ_y : stress in flow direction	(Pa)
U_a : superficial air velocity	(m/s)	τ_w : shear stress at the wall	(Pa)
u_s : particle velocity in a plug	(m/s)	ϕ : angle of internal friction	(deg)
α : ratio of calculation to experiment on u_s	(-)	ϕ_s : ratio of straight length on periphery	(-)
β : ratio of calculation to experiment on $\Delta P/L_T$	(-)	ϕ_w : angle of wall friction	(deg)
ε : voidage	(-)	ω : angle shown in Fig. 2	(deg)

References

- 1) Konrad, K. et al., : "Prediction of the Pressure Drop for Horizontal Dense Phase Pneumatic Conveying of particles", Pneumatic transport 5th conference BHRA Fluid engineering, Paper E1, pp.225-244 (1986)
- 2) Pan, R. and P. W. Wypych : "Pressure Drop and Slug Velocity in Low-Velocity Pneumatic Conveying of Bulk Solids", *Powder Technol.*, **94**, pp.123-132 (1997)
- 3) Tsuji, Y. : "Kuukiyusounokiso", pp.114-136, Yokendo (1984)
- 4) Mi, B. and P. W. Wypych : "Pressure Drop Prediction in Low-Velocity Pneumatic Conveying", *Powder Technol.*, **81**, pp.125-137 (1994)
- 5) Aziz, Z. B. and G. E. Klinzing : "Dense Phase Plug Flow Transfer - The 1-Inch Horizontal Flow-", *Powder Technol.*, **62**, pp.41-49 (1990)
- 6) Hong, GU and G. E. Klinzing : "Vertical Plug Flow of Cohesive Coal in 2- and 4-Inch Pipes", *Powder Technol.*, **57**, pp.59-67 (1989)
- 7) Konrad, K. : "Dense-Phase Pneumatic Conveying-A Review-", *Powder Technol.*, **49**, pp.1-35 (1986)
- 8) Jaworski, A. J. and T. Dyakowski : "Investigations of Flow Instabilities within the Dense Pneumatic Conveying System", *Powder Technol.*, **125**, pp.279-291 (2002)
- 9) Werner, D. : "Influence of Particle Size Distribution During Pneumatic Dense-Phase Conveying in Vertical and Horizontal Pipes", *Pneumatic Conveying*, **3**, pp.43-51 (1983)
- 10) Brooke Benjamin, T. : "Gravity Currents and Related Phenomena", *J. Fluid Mech.*, **31**, Part2, section3, pp.209-248 (1968)
- 11) Ergun, S. : "Fluid Flow Through packed Columns", *Chem. Eng. Prog.*, **48**, pp.89-94 (1952)
- 12) Nemec, D. and J. Levec : "Flow Through Packed Reactors", *Chem. Eng. Sci.*, **60**, pp.6947-6957 (2005)
- 13) Yamazaki, R. : "Kozeny-Carman's Equation", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **7**, pp.428-431 (1974)
- 14) Kofu, K., M. Ochi and M. Takei : "Proposal of Ergun's Equation Modified with Ratio of Straight Length to Particle Perimeter and Pipe Wall Effect", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **44**, pp.259-266 (2007)
- 15) Janssen, H. A. : "Versuche über Getreidedruck in Silozellen", *Z. ver. deut. Ing.*, **39**, pp.1045 (1895. In German)
- 16) Davidson, J. F. and D. Harrison : "Fluidized Particles", Cambridge University Press (1963)
- 17) Singh, B. : "Theory of Slugging Lifters", *Powder Technol.*, **21**, pp.81-89 (1978)
- 18) Baker, C. G. J. and D. Geldart : "An Investigation into the Slugging Characteristics of Large Particles", *Powder Technol.*, **19**, pp.177-187 (1978)