水平管粒体プラグ輸送における圧力損失予測式の導出* (粒子種類および管内径に対する高応用性)

河 府 賢 治^{*1}, 越 智 光 昭^{*1}, 武 居 昌 宏^{*1}

Derivation of Predicted Pressure Drop Equation on Granular Particle Plug Transportation in Horizontal Pipe (High Adaptability for Kinds of Particle and Pipe Diameter)

Kenji KOFU^{*2}, Mitsuaki OCHI and Masahiro TAKEI

^{*2} Department of Mechanical Engineering, College of Science & Technology, Nihon University,
1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8308 Japan

In a plug transportation that is one of gas-solid two-phase flow, the predicted equations on particle velocity within a plug and pressure drop in a horizontal pipe have been formulated. The agreement between values calculated by these equations and experiments that changed solid-air mass flow rate, pipe diameter, kinds of particle was obtained. The error between them is almost within 10%. In order to confirm the validity of supposition to derive these equations, particle velocity distribution within a plug in the directions of flow and radius, and particle velocity transformation from a stationary bed to a plug have been analyzed by high speed camera and PIV. As a result, there is no particle velocity distribution in a plug, and particles are accelerated uniformly in extra part of a plug. Particles in a plug are fixed relative to each other and so they all move with the same velocity.

Key Words: Pressure Drop, Particle Velocity, Pipe Line, Gas-Solid Two-Phase Flow, PIV

1. 結 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、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2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、これまで多くの研究者により研究され、プラグ輸送における圧力損失予測式が導かれている^{①)~⑤)}。しかしながら、これらの式は粒子輸送量や空気流量などの輸送条件、輸送粒子の種類、輸送管内径などを変更した時に計算値と実験値との誤差が大きくなるため、信頼性の高い実用的な式とは言えない。また、粒子形状により Ergun 式中の係数を変更する必要があるなどの問題

もある^{①)~③)}。筆者らは静止粒子充填層内の圧力損失予測式として、粒子形状および管内径を考慮した修正 Ergun 式を提案した^{④)}。この式は、実測値との誤差が±6%と精度が高く、さらに粒子種類、管内径および空気速度に対する適用範囲も広い。しかしこの式をプラグ輸送に適用するためには、予備実験を行い、粒子速度を測定する必要がある。

そこで本研究では、水平管プラグ輸送において、粒子種類、管内径および輸送条件に対し応用性が高く、予備実験が不要である実用的な圧力損失の予測式を導出することを目的とする。さらに粒子の流動状態を測定し、予測式導出における仮定の妥当性の検証も行う。

おもな記号

A	: 管断面積	[m ²]
D	: 管内径	[m]
d_p	: 粒子径	[m]
F	: プラグ前後端応力	[Pa]
g	: 重力加速度	[m/s ²]
l_{α}	: 単一プラグ前後部長さ	[m]
l_p	: 単一プラグ長さ	[m]
L_p	: プラグ総長さ	[m]

* 原稿受付 2007年3月8日。

^{*1} 正員, 日本大学理工学部(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)。

E-mail: kofu@mech.cst.nihon-u.ac.jp

L_T : 輸送管長さ	[m]
M_s : 粒子質量流量	[kg/s]
P : 管内空気圧力	[Pa]
ΔP : 圧力損失	[Pa]
U_a : 管内空気速度	[m/s]
U_{SP} : すべり速度	[m/s]
u_s : プラグ内粒子速度	[m/s]
W_P : プラグ速度	[m/s]
ε : 空隙率	[—]
μ_w : 摩擦係数	[—]
ρ_a : 空気密度	[kg/m ³]
ρ_B : かさ密度	[kg/m ³]
ρ_S : 粒子密度	[kg/m ³]
σ_r : 半径方向の粒子相互応力	[Pa]
σ_x : 流れ方向の粒子相互応力	[Pa]
τ_w : 壁面摩擦応力	[Pa]
ϕ : 内部摩擦角	[deg]
ϕ_s : 粒子直線率	[—]

2. 予測式の導出

図1に水平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、プラグ前端においてプラグ間の管底にある静止堆積層からプラグ内に粒子を取り込み、プラグ後端において同量の粒子をプラグ外へ吐き出している⁽¹⁷⁾。管断面全体を粒子が塞いでいる部分の長さをプラグ長さ l_p とし、 l_p と静止堆積層との間にある粒子層体積を管断面積 A で除した長さを l_α とする。 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、プラグ内粒子速度 u_s は主流および半径方向の位置に拘らず一定値と仮定する。さらに l_α 内の粒子は、静止堆積層から l_p までの間に等加速されるとし、 l_α 内の平均粒子速度を $0.5u_s$ とする。

l_p 内において、長さ dx の微小部分に作用する力の釣り合いを考える。 x だけの関数として全応力を仮定すると、

$$\frac{dP}{dx} + \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{4\tau_w}{D} = 0 \quad (1)$$

Fig. 1 Pressure within a plug in horizontal pipe

となる。ここで α_x 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 は管内径である。Konrad⁽¹⁾ は半径方向の粒子相互応力 σ_r に関し、 $\sigma_r > \alpha_x$ となる受動的崩壊において

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

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

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

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

を導いた。 ϕ は内部摩擦角、 c は粒子同士粘着力である。

次に、プラグの重さによる管壁への応力 P_g を考える。Konrad⁽¹⁾、Pan and Wypych⁽²⁾ および辻⁽³⁾ らは静水圧理論を適用し、 P_g を得ている。しかし、この場合粒子群は固体であることから、著者らはプラグ重さを管壁表面積で除した値を P_g と考え

$$P_g = \frac{\frac{1}{4} \rho_B \pi D^2 g dx}{\pi D dx} = \frac{1}{4} \rho_B g D \quad (6)$$

とする。プラグが剛体に近い状態で輸送される場合、粒子は受動的崩壊に従う⁽¹⁾。そこで式(6)を式(2)にそのまま加えることができるとすると

$$\sigma_r = K_w \sigma_x + (K_w + 1)c \cos \phi \cos(\omega + \phi_w) + \frac{1}{4} \rho_B g D \quad (7)$$

となる。輸送安定状態の場合、プラグ内の圧力損失を一定として考えることができる。故に式(1)(7)およびクーロンの法則を用い α_x について積分すると

$$\sigma_x = k \exp \left[-\frac{4\mu_w K_w}{D} x \right] - \frac{\Delta P}{l_p} \frac{D}{4\mu_w K_w} - \frac{(K_w + 1)c \cos \phi \cos(\omega + \phi_w)}{K_w} - \frac{\rho_B g D}{4K_w} - \frac{C_w}{\mu_w K_w} \quad (8)$$

となる。 k は積分定数、 ΔP はプラグ前後の圧力差、 μ_w は摩擦係数、 C_w は管壁と粒子との粘着力である。Janssen の解析結果⁽¹⁸⁾よりプラグ前後端 ($x=0, l_p$) において $\alpha_x = F$ とする。故に式(8)は

$$\frac{\Delta P}{l_p} = \frac{4\mu_w K_w F}{D} + \frac{4\mu_w (K_w + 1)c \cos \phi \cos(\phi_w + \omega)}{D} + \rho_B g \mu_w + \frac{4C_w}{D} \quad (9)$$

となる。

次に、 F について考える。 F に関しKonrad⁽¹⁾ らは静止堆積層と l_p 内との運動量の差より得ている。ところが、静止堆積層と l_p との間に l_α があるため、Konrad⁽¹⁾ らによる F は適用が難しいと言える。そこで著者らは F を l_p と

Fig.2 Particle velocity (Plug velocity axis)

l_{ex} との境界における運動量の差より求める。図 2 に示すとおりプラグ速度 W_p における座標系を考える。この図より

$$F = \frac{1}{2} \frac{G_s}{A} u_s \quad (10)$$

となる。ここで G_s は単位時間当たりにプラグ内に取り込まれ吐き出される粒子の質量である。プラグ前後端において粒子の吸い込みと吐き出しがあるため、 u_s と W_p とは異なる。図 2 から G_s は

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

と表せる。Brooke Benjamin⁹⁾の気液二相流理論を W_p と u_s との関係に適用すると

$$W_p = u_s + 0.542 \sqrt{gD} \quad (12)$$

と表わせる。式(10)~(12)より

$$F = 0.271 \rho_B u_s \sqrt{gD} \quad (13)$$

となる。非粘性粒子を考え

$$C_w = c = 0 \quad (14)$$

とすると、式(13)および(14)より式(9)は

$$\frac{\Delta P}{l_p} = \mu_w \rho_B g + 1.084 \mu_w K_w \rho_B u_s \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (15)$$

となる。

また、このプラグ内の圧力損失に関して Ergun 式¹⁰⁾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⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。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

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{l_p} = 150 \left(1 + \frac{2d_p(1-0.645\phi_s)}{3D(1-\varepsilon)} \right)^2 \frac{\eta(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \{(1-0.645\phi_s)d_p\}^2} U_{sp} \\ + 1.75 \frac{\rho_a(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3(1-0.645\phi_s)d_p} U_{sp}^2 \end{aligned} \quad (16)$$

を提案⁶⁾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。 ϕ_s は、図 3 に示す通り粒子 2 次元投影画像における周長 l_s と直線部の長さ l_i との比

Fig.3 Ratio of straight length

である。直線部の数を N_s とすると、式(17)として与えられる。

$$\phi_s = \sum_{i=1}^{N_s} l_i / l_s \quad (17)$$

ϕ_s は、0 から 1 の実数で与えられ、球形粒子は 0、立方体粒子は 1 となる。ここで U_{sp} は空気速度 U_a を用い、

$$U_{sp} = U_a - u_s \quad (18)$$

とすると、式(15)(16)および(18)から

$$\begin{aligned} u_s^2 - \left(\frac{a}{b\rho_a} + 2U_a + \frac{1.084\mu_w K_w \rho_B}{b\rho_a} \sqrt{\frac{g}{D}} \right) u_s \\ + \frac{aU_a}{b\rho_a} + U_a^2 - \frac{\rho_B g \mu_w}{b\rho_a} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

が導ける。ここで

$$a = 150 \left(1 + \frac{2d_p(1-0.645\phi_s)}{3D(1-\varepsilon)} \right)^2 \frac{\eta(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \{(1-0.645\phi_s)d_p\}^2} \quad (20)$$

$$b = 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3(1-0.645\phi_s)d_p} \quad (21)$$

である。式(19)より u_s に関して 2 つの解が得られるが、大きい方の値は負のすべり速度を与えるため、小さい方の値を用いる。故に

$$\begin{aligned} u_s = \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b\rho_a} + 2U_a + \frac{1.084\mu_w K_w \rho_B}{b\rho_a} \sqrt{\frac{g}{D}} \right) \\ - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{b\rho_a} + 2U_a + \frac{1.084\mu_w K_w \rho_B}{b\rho_a} \sqrt{\frac{g}{D}} \right)^2 - 4 \times \left(\frac{aU_a}{b\rho_a} + U_a^2 - \frac{\rho_B g \mu_w}{b\rho_a} \right)} \end{aligned} \quad (22)$$

となる。

プラグ輸送では、粒子の塊であるプラグ部だけでなく空気の塊であるスラグ部もあるため、この部分も含めた圧力損失の式へ拡張を行う必要がある。管内に存在する総プラグ長さ L_p と管長 L_T との関係について近似的に

$$L_p = \frac{M_s L_T}{A \rho_B u_s} \quad (23)$$

が導ける。空気スラグ部の圧力損失は、プラグ部に比べ非常に小さいため、この部分の圧力損失を無視する。式(15)の l_p を L_p に置き換え、式(23)を代入すると

$$\frac{\Delta P}{L_T} = \frac{M_s}{A \rho_B u_s} \left[\rho_B g \mu_w + 1.084 \mu_w K_w \rho_B u_s \sqrt{\frac{g}{D}} \right] \quad (24)$$

となる。この式より、水平管における圧力損失を求めることができる。

3. 実験装置および方法

図4に本研究に用いた実験装置を示す。輸送管は $D=25.6, 38.0$ および 50.0mm の3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、粒子輸送量 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。また図4に示すとおり、輸送管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 0.05sec 毎 30sec 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、 $U_a=1.1\sim 5.0\text{m/s}$ 、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間にある堆積層から l_p 内へ取り込まれるまでの粒子速度の変化、および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（フォトロン製 FASTCAM-APX RS 250K）と PIV を用いた。高速度カメラによる撮影は、 $1024 \times 1024\text{pixels}$ 、 2000fps にて行った。PIV の検査領域は $45 \times 45\text{pixel}$ とし、相関係数は 0.7 とし解析を行った。解像度は、1画素 0.056mm 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 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（ソニー製 DCR-VX2000）を用いた。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。図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。高速度カメラおよびデジタルビデオカメラを図4の破線部に設置した。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 $D=38$ および 50mm におけるポリエチレンペレット、 $D=38\text{mm}$ におけるプラスチックペレットにて行った。

実験に用いた粒子は、菜種、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り、物性値を表1に示す。

Fig. 4 Experimental apparatus

Fig. 5 Measurement of particle velocity by digital video

Table1 Particle properties

Solids	Rapseed	Polystyrol pellet	Polyethylene pellet	Nipolon hard	Plastic pellet
Mean particle diameter d_p (mm)	1.98	2.80	3.27	3.54	6.00
Straight length ratio ϕ_s	0.020	0.369	0.184	0.132	0.000
Voidage ϵ	0.420	0.383	0.378	0.416	0.461
Bulk density ρ_B (kg/m^3)	435	678	591	531	572
Particle density ρ_s (kg/m^3)	1050	1100	950	910	1061
Angle of internal friction ϕ (deg)	25.3	35.4	27.0	30.7	30.0
Coefficient of friction μ_w	0.365	0.439	0.360	0.288	0.250
Shape	Sphere	Column	Disk	Oval	Sphere

* Against polyacrylic plate

Fig. 6 Velocity vector in a plug (Plastic pellet, $m_T=62.8$)

4. 実験結果

PIV によるプラグ内粒子の速度ベクトルの一例（プラスチックペレット， $m_f=62.8$ ）を図 6 に示す。ベクトルは 50 フレーム間の平均値とする。図 6 よりベクトルは全て主流方向のみ向いており、主流と直角となる y 方向に粒子が動かないことがわかる。

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、図 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 $D \times D$ の範囲内における 50 フレーム間およびプラグ 3 個の平均値とした。図 7 から、ビデオカメラによる測定値と PIV による値とが近い値となることが分かる。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考える。

さらに、主流および y 方向位置に対する粒子速度分布を調べるため、横軸に PIV による粒子速度、縦軸に管底からの距離 y と D との比 y/D をとり、図 8 に示す。図 8 から y/D に拘らず、ほぼ一定の速度を示していることがわかる。PIV による測定値は、管壁面における粒子の速度分布である。辻⁽¹³⁾および Chen⁽¹⁴⁾はプラグ内の粒子速度は y 方向位置、あるいは管断面位置により分布があると考えている。しかし本実験において、 l_p 内の壁面部の粒子が回転していないこと、および田中⁽¹⁵⁾らのシミュレーションによる研究結果において、壁面付近と管中心付近の速度がほぼ等しいことから、 l_p 内の粒子は管断面位置に拘らず等速で動くと考えても良いと言える。

また、プラグ間の静止堆積層から l_p 内に取り込まれるまでの主流方向の粒子速度変化を調べる。主流方向位置が同じであり、 y 方向位置が異なる各検査領域をとり、各検査領域における主流方向粒子速度の時系列変化を PIV より得る。この領域における粒子速度平均値の時系列変化の一例（ポリエチレンペレット， $D=50\text{mm}$ ， $m_f=40.2$ ）を図 9 に示す。なお、管内を浮遊する粒子速度を除くため、撮影画像を観察しながら、管壁まで粒子が満たされている検査領域の速度の平均値を粒子速度とした。図 9 より、プラグ内の粒子は流れ方向の位置に拘らず一定の速度で動くことがわかる。この結果および図 6 と図 8 における結果から、プラグ内の粒子は主流および半径方向位置に関係なく一定の速度で動く、つまりプラグ内の粒子は相互に固定され、一塊で輸送されていると言える。また図 9 から、プラグ間の管

Fig.7 Confirmation on validity of analysis by PIV

Fig.8 Particle velocity distribution in a plug

Fig.9 Particle velocity at each position
(Polyethylene pellet, $D=50\text{mm}$, $m_f=40.2$)

底部に静止状態で堆積している粒子が l_p 内で等加速されていることがわかる。故に l_p における粒子速度を $0.5u_s$ として考えることができると言える。

5. 圧力損失予測式の検討

修正 Ergun 式を導入したプラグ内粒子速度式(22)，および圧力損失予測式(24)の実用性に関し、著者らを含めた国内外の研究者（Konrad⁽¹⁾，Pan and Wypych⁽²⁾，辻⁽³⁾，Mi and Wypych⁽⁴⁾および Aziz⁽⁵⁾）の式について検討を行う。

Fig.10 Comparison of experiment with calculation (Konrad)

Fig.12 Comparison of experiment with calculation (Tsuiji)

Fig.11 Comparison of experiment with calculation (Pan and Wypych)

Fig.13 Comparison experiment with calculation (Mi and Wypych)

各研究者ごとに、横軸に U_a をとり、縦軸に u_s または $\Delta P/L_T$ に関する計算値と実験値との比をとり、図 10～15 に示す。計算値と実験値との比において u_s に関する比を α 、 $\Delta P/L_T$ に関する比を β とする。 u_s はより多くのプラグの平均をとるため、および PIV を用いた図 8 および 9 から l_p 内位置により u_s は変わらないと言えるため、ビデオカメラによる値を用いた。 $\Delta P/L_T$ の計算で必要となる粒子速度は、各研究者の式により計算される値を用いた。但し、Aziz は速度に関する式を示していないため、Aziz の u_s に関する計算値と実験値との比較は行わず、 $\Delta P/L_T$ の計算で必要となる粒子速度は実験値を用いた。また Pan and Wypych, および Mi and Wypych は、

u_s ではなく W_p の式を導いているため、式(12)を用いて u_s を求め、実験値との比較を行った。なお計算に必要な ρ_a は、管内圧より得られる実験値を用いた。

Konrad, Pan and Wypych, 辻, Mi and Wypych および Aziz らの式は、粒子の重さについて静水圧理論を適用している点、および F を求めるとき Aziz は U_a と W_p との差、その他の研究者は、静止堆積層と l_p 内との粒子速度差を用いている点が著者らの式と異なる。また Konrad は U_{sp} に空塔粒子速度を導入している点、Pan and Wypych および Mi and Wypych はプラグを主動的崩壊として考えている点、Pan and Wypych は U_{sp} を U_a と W_p との差と考えている点が著者らの式と異なる。

図10(A)より Konrad の式による α は、0.6 から 1.5 まで分布しており、誤差が大きいことがわかる。これは実在しない空塔粒子速度を U_{sp} へ適用したため、誤差が生じたと考えられる。また図 10(B)から、 $U_a=2.0\sim3.0\text{m/s}$ において、 $D=38\text{mm}$ におけるポリエチレンペレット、プラスチックペレットおよび菜種の場合、 β は 1.0 に近く計算値と実験値に合致性が見られるが、他の粒子および他の条件では全く合致性が見られないことがわかる。さらに β が 1.0 より大きいことがわかる。この結果から Konrad の式による圧力損失は、実際の値より大きく見積もっている、特定の粒子および輸送条件しか適用できないと言える。

図11(A)(B)より Pan and Wypych の式は、菜種を除き $U_a > 3.0\text{m/s}$ において α , β とも 1.0 に近く、 u_s , $\Delta P/L_T$ とも良い合致性を示している。しかし $U_a < 3.0\text{m/s}$ では α , β とも 1.0 と隔たりが生じ、誤差が大きくなることがわかる。これは U_{sp} において U_a と W_p との差を考えているためと言える。 U_a が大きくなると u_s が大きくなり W_p も大きくなる。このとき、式(12)中の $0.542\sqrt{gD}$ の影響が小さくなる。ところが U_a が小さい場合、 $0.542\sqrt{gD}$ の影響が大きくなり、誤差が生じたと考えられる。故に U_{sp} は U_a と W_p との差では考え難いと言える。

図 12(A)(B)より辻の式は、実験値と比べ α が 1.0 より小さく、 β が 2.0 前後と大きくなっている。これは、静水圧理論を適用した重力による圧力損失への影響、および静止層と l_p との速度差で考えた F による圧力損失を実際の値より大きく見積もっているためと考えられる。

図 13(A)(B)より Mi and Wypych らの式による α および β は、全く実験値と同様の傾向を示していない。Mi and Wypych は u_s に関し、特定の条件における実験値から U_a との関係式を導いており、応用性に欠けるため誤差が生じたと考えられる。

図 14(B)より Aziz の式による β に関し、計算値と実験値とに全く合致性が見られないことがわかる。この結果より、粒子流動による圧力損失は、 U_a と W_p との差で考え難いと言える。

以上の結果から、各研究者における u_s および $\Delta P/L_T$ に関する計算値と実験値とに誤差が生じることがわかる。ところが図 15(A)(B)に示す著者らの式による α および β は、粒子種類、管内径、空気速度などの輸送条件に拘らず、ほぼ 1.10 から 0.90 の範囲内に収まることかわかる。故に著者らの u_s の式および $\Delta P/L_T$ の予測式は、実験値と $\pm 10\%$ の誤差範囲内に収まる適用範囲の広い式であると言える。これは本研究における U_{sp} の取り方、重力による圧力損失への影響、および F の決定

Fig.14 Comparison experiment with calculation (Aziz)

Fig.15 Comparison of experiment with calculation (This study)

Fig.16 Pressure drop versus particle velocity

方法が適切であったためと考えられる。

さらに、式(24)による重力および粒子流動それぞれに起因する圧力損失見積りの妥当性についても調べる。横軸に無次元粒子速度 $K_w u_s / \sqrt{gD}$ 、縦軸に無次元プラグ内圧力損失 $(\Delta P/L_T)/(\rho g U_w)$ をとり図 16 に示す。図中のプロット点は、測定された ΔP を式(23)から計算される L_p および $\rho g U_w$ で除した値である。なお式(23)の u_s

には、実験値を用いた。また図中の実線は、式(24)を(23)および $\rho_s g \mu_w$ で除すことで得られる次の式(25)

$$\frac{\Delta P}{L_p} \cdot \frac{1}{\rho_s g \mu_w} = 1 + 1.084 \frac{K_w u_s}{\sqrt{gD}} \quad (25)$$

により計算で求められる予測線である。ここに、式(25)の右辺第一項は粒子の重力による圧力損失を表し、右辺第二項はプラグ前後の粒子吸込みと吐出しを伴う粒子流動による圧力損失を表している。図 16 において、予測線の y 切片が重力による圧力損失、その傾きが u_s の増加に対する粒子流動による圧力損失の増加率を表している。この図 16 より、式(25)と実験値とが全ての粒子種類、管内径および輸送条件において、ほぼ一致していることがわかる。この結果、著者らの圧力損失予測式(24)は、重力による影響および粒子流動による影響とも適切に見積もっており、応用性が高く、精度が高い式であると言える。

6. 結 論

本報では、水平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、菜種、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 25.6, 38.0, 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 1.1~5.0m/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) 高速度カメラおよび PIV による測定の結果、壁面付近におけるプラグ内の粒子速度は、位置に拘らず一定値となる。この結果および田中らの研究結果から、プラグ内の粒子は粒子相互で固定された状態で輸送されていると言える。
- (2) 高速度カメラおよび PIV による測定の結果、プラグ内に取り込まれる粒子は、静止充填層から等加速されプラグ内に取り込まれる。しかしプラグ内に取り込まれるとほぼ等速で粒子は動く。
- (3) 本研究において、修正 Ergun 式を導入したプラグ内粒子速度式(22)、および圧力損失予測式(24)を導出した。これらの式による予測値と実験値との誤差は、プラグ内粒子速度および圧力損失ともほぼ $\pm 10\%$ の誤差範囲内に収まる。さらに、重力および粒子流動に起因する各圧力損失に関し、式(24)による見積りは、適切であると言える。

文 献

- (1) Konrad, K., Prediction of the pressure drop for horizontal dense phase pneumatic conveying of particles, *Proceedings of 5th conference BHRA Fluid engineering*, Paper E1 (1986), pp.225-244
- (2) R.Pan, P.W.Wypych, Pressure drop and slug velocity in low-velocity pneumatic conveying of bulk solids, *Powder Technology*, Vol.94 (1997), pp.123-132
- (3) Tsuji, Y., Pneumatic transportation basic in Japanese, Yokendo (1984), pp.114-136
- (4) B.Mi, P.W.Wypych, Pressure drop prediction in low-velocity pneumatic conveying, *Powder Technology*, Vol. 81 (1994), pp.125-137
- (5) A.B.Aziz and G.E.Klinzing, Dense phase plug flow transfer -The 1-inch horizontal flow-, *Powder Technology*, Vol. 62 (1990), pp.41-49
- (6) Kofu, K., Ochi, M., Takei, M., Proposal of Ergun's Equation Modified with Ratio of Straight Length to Particle Perimeter and Pipe Wall Effect, *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, Vol.44, No.4(2007), pp.259-266
- (7) Artur J. Jaworski, Tomasz Dyakowski, Investigations of flow instabilities within the dense pneumatic conveying system, *Powder Technology*, Vol.125,(2002), pp.279-291
- (8) Janssen, H.A., Versuche uber Getreidedruck in Silozellen, *Z.ver.deut.Ing.*, 39, 1045(1895. In German)
- (9) Brooke Benjamin, T., Gravity currents and related phenomena, *The Journal of Fluid Mechanics*, Vol.31, Part2, section3(1968), pp.209-248
- (10) Ergun, S., Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, Vol.48, No.2 (1952), pp.89-94
- (11) D.Nemec and J.Levac, Flow through packed reactors, *Chemical Engineering Science*, Vol.60, (2005), pp.6947-6957
- (12) R.Yamazaki, Kozeny-Carman's Equation, *Journal of the Society of Powder Technology, Japan*, Vol.11, No.71(1974), pp.428-43 (in Japanese)
- (13) Tsuji, Y., Morikawa, Y., Plug flow of coarse particles in a horizontal pipe, *Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME*, Vol.104 (1982), pp.198-206
- (14) Dongming Chen, James F.Klausner, Renwei Mei, A fluid mechanics approach to describing the behavior of pneumatically conveyed powder plugs, *Powder Technology*, Vol.124(2002), pp.127-137
- (15) Tanaka, T., Ishida, T., Tsuji, Y., Direct numerical simulation of granular plug flow in a horizontal pipe (the case of cohesionless particles), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.57, No.534(1991), pp.456-463