

水平管粒体プラグ輸送の圧力波形シミュレーション Simulation of Pressure Waveform for Granular Particle Plug Conveying

○中川 実¹, 河府 賢治², 越智 光昭²
Minoru NAKAGAWA¹, Kenji KOFU², Mitsuaki OCHI²

Abstract: The pressure waveform has been simulated in the horizontal pipeline of the granular plug transportation. The simulation was carried out for four kinds of particles. The number of experimental transporting condition is five at each particle. Consequently, the pressure in horizontal pipe was able to be simulated by using pressure drop equation. The calculation value of polyethylene pellet is the closest with experiments in four particles. The cause of error margin is assumed two factors. One is that the plug length is taken not the theoretical value but measurements. The other is static electricity and vibration had influences on measurements. If such factors were removed, accuracy prediction will be realized and suitable transportation line will be able to be designed.

1. 緒言

粉粒体空気輸送方式の一つであるプラグ輸送において、管内の圧力波形シミュレーションは重要な役割を持つ。この理由として輸送管内の圧力変動により振動が発生し、管を固定する部品が破損するのを防ぐのをあらかじめ設計時に予測できることが挙げられる。また、輸送管が粒子で閉塞状態になると、圧力上昇により輸送管が破損する可能性がある。現在における設計ではこれを防ぐために、輸送ライン途中に空気を補助的に供給する方法がある。しかし、現状では空気供給管の取り付け位置を経験則で設計している。もし圧力波形シミュレーションが可能ならば、設計時にライン中のプラグ長さを予測して取り付け位置を決める事ができる。そこで、本研究では、水平輸送管における圧力変動を求める計算を試み、実験値との比較検討をした。

2. 理論および実験装置と方法

本実験では圧送輸送方式を採用しており、実験装置を Fig.1 に示す。空気源にはエアークンプレッサーを、その圧縮空気を溜めるため減圧弁を取り付けたエアチャンバを使用している。その後方に空気流量の測定及び調節のために、フローメータを設置した。また、ブロータンクを用いてその出口には粒子供給弁を取り付け、粒子流量を測定するためにロードセルを設けた。輸送管には圧力損失と管内平均圧を測定するために圧力タップを輸送管上部に 1ch~6ch 取り付け。この圧力タップの圧力を圧力センサで読み取り、動ひずみ計を介してデジタルレコーダに出力する。以上で測定された数値を用いて水平管内での圧力変動を測定する。また、光電センサによりプラグの長さ l_p の測定も行う。なお実験は減圧弁、空気流量、粒子供給弁を変え各粒子において 5 条件測定を行なう。

本研究での使用粒子は Polystyrol pellet, Nipolon hard, Polyethylene pellet, Plastic pellet の 4 種類である。それぞれの物性値を Table1 に、シミュレーションに使う式を以下に示す。¹⁾

ここで、 u_s はプラグ内粒子速度、 l_a は空気長さ、 K_w は管壁における内部摩擦係数、 $\Delta P/l_p$ はプラグ部分の圧力損失、 μ_w が管摩擦係数、 ε が空隙率、 d_p が粒子径、 ρ_B がかさ密度、 ϕ が安息角、 ϕ_w が壁面摩擦係数、 W_p がプラグ速度を表す。

主な計算方法として輸送ラインの終点は大気開放であり、管内圧力 P は大気圧となるので初期値 $P=0\text{kPa(gage)}$ を与える。この位置における ρ_a を求める。次に式(1)、(2)より u_s を求め、式(6)で W_p を求めておく。さらに測定した l_p を用いて式(3)から l_a を求める。そして式(5)より $\Delta P/l_p$ を求める。この計算を用いてプラグの部分の範囲では $\Delta P/l_p$ で圧力上昇し、空気のところでは圧力上昇のないプログラムを作成する。計算区間は微小区間 0.05m 刻みで輸送ライン終点から水平管部分 (4.65m) まで繰り返し計算する。

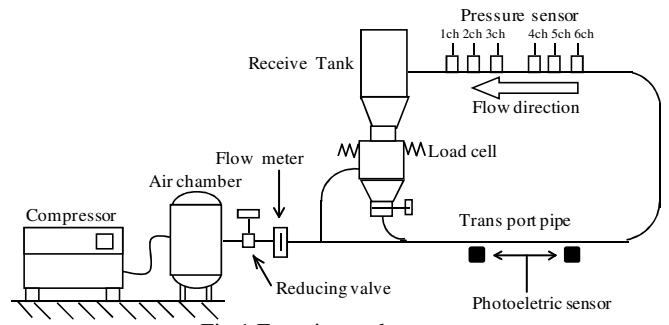


Fig.1 Experimental apparatus

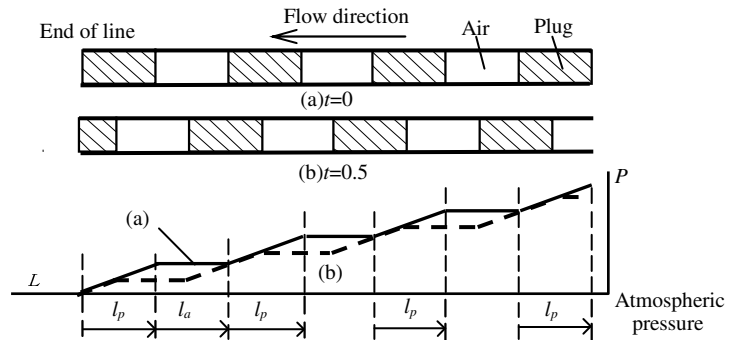


Fig.2 Pressure rise

Table1 Particle properties

Solids	Poly styrol pellet	Nipolon hard	Polyethylene pellet	Plastic pellet
Friction coefficient of pipe μ_w [-]	0.360	0.439	0.250	0.288
Percentage of air voids ε [-]	0.378	0.383	0.425	0.416
Particle diameter d_p [mm]	3.27	2.80	6.00	3.54
Particle density ρ_p [kg/m^3]	950	1100	1061	910
Bulk density ρ_B [kg/m^3]	591	678	572	531
Angle of repose ϕ [deg]	27.0	35.4	30	30.7
Angle of wall friction ϕ_w [deg]	19.80	23.70	14.00	16.07

$$u_s^2 - \left(\frac{a}{b\rho_a} + 2U_a + \frac{1.084\mu_w K_w \rho_B}{b\rho_a} \sqrt{\frac{g}{D}} \right) u_s + \frac{aU_a}{b\rho_a} + U_a^2 - \frac{\rho_B g \mu_w}{b\rho_a} = 0 \quad (1)$$

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

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

$$\frac{M_s}{A\rho_B u_s} = \frac{l_p}{l_p + l_a} \quad (4)$$

$$K_w = \frac{1 + \sin\phi \cos(\omega + \phi_w)}{1 - \sin\phi \cos(\omega + \phi_w)}, \sin\omega = \frac{\sin\phi_w}{\sin\phi}, \tan\phi_w = \mu_w \quad (5)$$

$$\frac{\Delta P}{l_p} = \mu_w \rho_B g + 1.084\mu_w K_w \rho_B u_s \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (6)$$

$$W_p = u_s + 0.542\sqrt{gD} \quad (6)$$

すると輸送ラインの圧力損失が Fig.2 の $t=0$ の様に得られる, また, 時間経過によりプラグは管内を移動することを考え, プログラムのプラグの指定範囲の部分に先の計算で求めた W_p を用いて $t=0$ から 0.1 毎に移動距離を求め, Fig.2 の $t=0.5$ の様にプラグが時間に伴い移動するシミュレーションを行う。

3. 結果および考察

代表して Polyethylene pellet の結果を示す. Fig.3 は(a)に $M_a=7.30 \times 10^{-3} \text{kg/s}$, (b)に $M_a=7.47 \times 10^{-3} \text{kg/s}$ の時のシミュレーションにおける圧力と距離の関係図で 0sec, 3sec, 6sec の場合のプラグ移動の様子を示す. Fig.4 と Fig.5 はそれぞれ $M_a=7.30 \times 10^{-3} \text{kg/s}$ と $M_a=7.47 \times 10^{-3} \text{kg/s}$ における理論値, 実験値の時間に対する圧力変動で(a)は終点から 1.55m, (b)は 3.55m を示す.

Fig.3 より(a)のときは 3sec が 6sec より後ろ側に線があるのに対して(b)のときは順番通りであることが分かる. これは l_a が(a)のときのみ長いためプラグの移動に時間を費やしたためである. またそれぞれの時間系列により圧力差があるのは粒子速度の変動による影響が考えられる. 次に Fig.4,5 よりそれぞれの波形を平均し誤差を比較したところ, 全ての条件で誤差が 1kPa 未満になるが, プラグ数が一致していないことがわかった, これは振動および静電気の影響が微小ながら出ているため, またプラグ長さに関しては固定値として与えたのでこの影響も考えられる.

4. 結論

- (1) プログラミングにより, 水平管内の圧力波形のシミュレーションを行うことができた.
- (2) Polyethylene pellet に関して時間に対する圧力変動誤差が少ない上にプラグ数がほぼ一致しているため, 設計に流用可能と考えられる.
- (3) 計算値と実験値との圧力変動誤差は, 静電気や振動等の外的要因, プラグ長さを算出していないためと考えられる.

5. 参考文献

- 1) 河府賢治, 越智光昭, 武居昌宏: 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), 日本機械学会論文集 (B 編), 73 巻 733 号, pp.1868-1875 (2007)

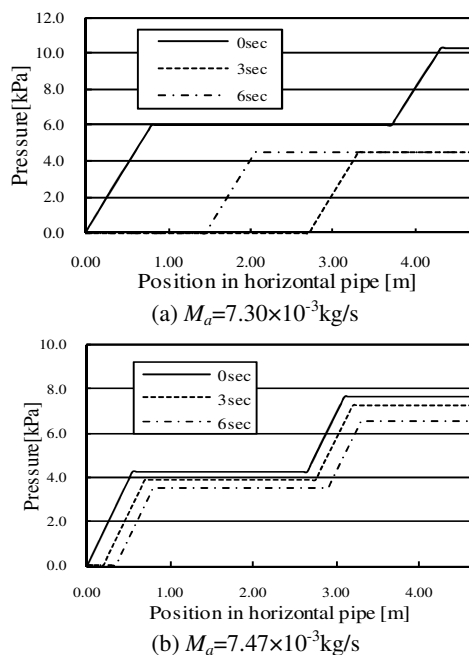


Fig. 3 Pipe inside pressure rise (Polyethylene pellet)

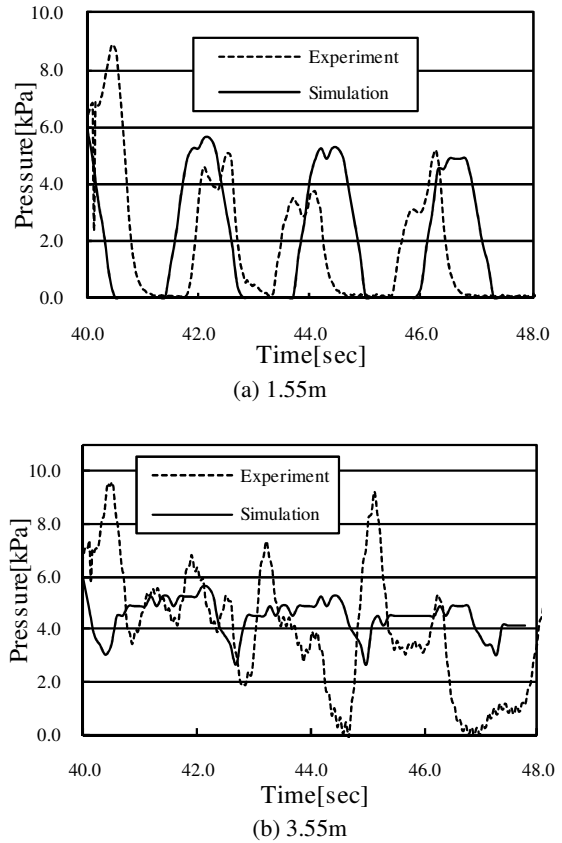


Fig.4 Comparison of simulation with experiment (Polyethylene pellet, $M_a=7.30 \times 10^{-3} \text{kg/s}$)

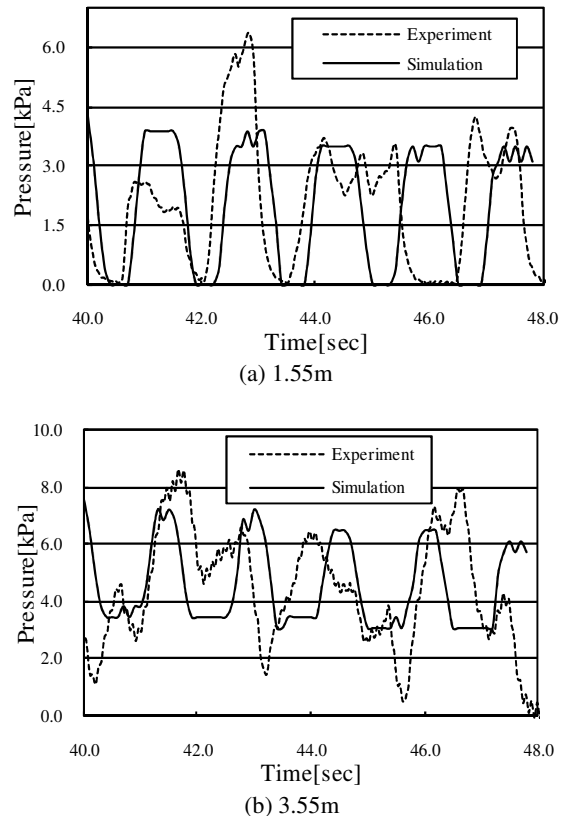


Fig.5 Comparison of simulation with experiment (Polyethylene pellet, $M_a=7.47 \times 10^{-3} \text{kg/s}$)