ブリード機構を有するインゼクションフィーダーの流動特性 および輸送量特性に関する解析

Analysis for Flow and Feed Rate Characteristics of Injection Feeder with Bleeding Holes

上田 寛^a, 堀井 清之^b, 富田 侑嗣^c

Hiroshi Ueda, Kiyoshi Horii, Yuji Tomita

Received 17 September 2003 ; Accepted 10 December 2003

The effect of bleeding holes has been studied on a pneumatic conveying system consisting of injection feeder. The essential feature of the system is the control of particle feeding rate by bleeding off supplemental air just behind the feeder which results in an increase in particle flow rate. In this paper, the characteristics were investigated theoretically. The theoretical results agree well with the measurements in terms of air flow rate and particle flow rate.

Keywords : Pneumatic conveying, Bleeding holes, Injection feeder, Particle flow rate, Air flow rate

1. 緒 言

空気輸送装置の粒子混入器としてのインゼクションフィーダーの性能は、空気の供給流量やインゼクションフィーダーによる回復圧力、さらに、管内圧力損失等に支配される。空気の供給流量の増大は粒子の吸引能力の増加につながるが、輸送管内の圧力損失は供給流量の増加に伴い管内風速のおよそ二乗に比例して増加する。圧力損失が増加し、回復圧力に近づくと搬送能力の低下が生じ、圧力損失が回復圧力を上回れば粒子の吸引は不可能になる。

この問題を解決する方法の一つとして、フィーダー

直後の輸送管に抜き孔を設けて、気流の一部を外気に流出させる方法（本研究では、ブリード機構と呼ぶ）がある¹⁾。この機構により、管内流速の不要な増加を抑え、フィーダーの吸気能力を改善することで、圧縮空気の過剰供給時においても粉粒体の吸引能力は維持できると考えられる。その他、カプセル輸送では、カプセルの速度制御にも利用されている²⁾。なお、吸引式の空気輸送の吸い込みノズル直後の二次空気孔は、粒子の過剰吸引による管路閉塞を避けるために粒子の管内濃度を低下させるものであり、本研究の抜き孔とは異なった作用である。

著者らは、既報³⁾において上記の問題をスパイラルフローノズルの使用とブリード機構により解決し、効果的な粉粒体輸送の機構を実験および理論解析により解明した。本研究では、インゼクションフィーダーの流動特性に及ぼすブリード機構の有効性を、より詳細な理論解析により検証し、既報の実験結果と比較した。さらに、既報で検討されていなかった固気二相流における理論解析を行い、輸送量に及ぼすブリード機構の効果について考察した。

2. 輸送装置のコンセプト

実験装置については既報³⁾に詳細な説明があるため、ここでは概略を説明する。

空気輸送装置への応用を考慮したインゼクションフ

a 大鵬薬品工業株式会社生産技術部
(〒771-0194 徳島県徳島市川内町平石夷野224-2)
TEL 088-665-6054
Taiho Pharmaceutical Co., Ltd.
Manufacture Technology Department
(224-2 Ebisuno, Hiraishii, Kawauchi-cho, Tokushima
771-0194)

b 白百合女子大学文学部
(〒182-8525 東京都調布市緑ヶ丘1丁目25番地)
TEL 03-3326-7604
Shirayuri Women's College
(1-25 Midorigaoka, Chofu-shi, Tokyo 182-8525)

c 九州工業大学工学部機械知能工学科
(〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)
TEL 093-884-3157
Kyushu Institute of Technology
(1-1 Sensuimachi, Tobata-ku, Kitakyushu 804-8550)

Fig. 1 Injection feeder having bleeding holes

ィーダー⁴⁾の構造を Fig. 1 に示す。バッファー部に導入された圧縮空気は、傾斜した環状スリットよりノズル内に噴出する。スリットから噴出した環状ジェットは、コアンダ効果により、湾曲したノズル内壁面に沿って軸方向に流れを変える。ノズル入り口付近に存在する粉粒体は、周囲の空気と共にノズル内に吸引されノズル出口から排出されるが、ノズル出口に輸送配管を接続しておけば空気輸送が可能となり、機械的な供給機構や気密性ホッパーが不要な、簡易な空気輸送装置を構成することができる。ブリード機構の効果を確認するために、ノズル出口のホース接続部分に直径 3mm の孔を 2 箇所 (総面積 0.141cm²) または 5 箇所 (総面積 0.353cm²) 開け、ブリード量の調整が可能となっている。

3. 解析モデルおよび解析方法

実験装置に対応する理論解析モデルを Fig. 2 に示す。既報³⁾の実験的研究では、ノズルへの粒子供給は、ホッパー内の粒子層にノズルを 45° 傾斜させて差し込んでいたが、本研究における理論解析では Fig. 2 に示すように垂直とし、輸送管路は水平に配置されているものとする。ノズルは、Fig. 1 に示したように、環状スリット部から喉部にかけて湾曲しているが、計算では無視する。運動量の理論を使って解析するが、その際、検査対象となる装置内の流れは、圧縮空気供給部付近①とそれ以外②の二つに分けて扱う。

3. 1 単相流の解析モデル

単相流については既報で一部分計算した³⁾。本方式のインゼクションフィーダーでの圧力上昇は 20kPa 程度なので、管内の空気密度 ρ の変化は小さいとして無視し、 ρ は一定とする。

ブリード機構がない場合、ノズル入口部についての運動量の式、外気からノズル入口部までのベルヌーイの式およびノズル喉部直後とブリード部直前の間についての運動量の式は、それぞれ次のように表される。

Fig. 2 Theoretical model

$$\rho Q_2 U_2 - \kappa \rho Q_1 U_1 - \rho Q_3 U_3 = (p_3 - p_2) A_2 \quad (1)$$

$$p_3 + \frac{1}{2} \rho U_3^2 = p_0 \quad (2)$$

$$\rho Q_m U_m - \rho Q_2 U_2 = (p_2 - p_m) A_m \quad (3)$$

また、空気の連続の式は以下の通りである。

$$\rho Q_1 + \rho Q_3 = \rho Q_2 \quad (4)$$

$$Q_2 = Q_m \quad (5)$$

ここで、 Q は空気の流量、 U は空気の速度、 A は検査体積の断面積、 p は絶対圧力、 p_0 は大気圧を表し、添字 1, 2, 3 および m は、それぞれ環状スリット部、ノズル喉部、ノズル入口およびブリード部直前を示す。 κ はノズルに供給される気流の運動量の軸成分係数であり、本研究では、ノズルの環状スリット噴出角度を θ とするとき、 $\kappa = \cos \theta$ として与える。

ブリード機構がある場合、ブリード部前後についてのベルヌーイの式は

$$\frac{1}{2} \rho U_m'^2 + p_m = \frac{1}{2} \rho U_m'^2 + p_m' \quad (6)$$

である。ここで、 p_m' はブリード部後の圧力、 U_m' はブリード部後の輸送管内の平均流速である。

ブリード孔からの流出流量を Q_b とすると、気流の連続の式より

$$Q'_m = Q_m - Q_b \quad (7)$$

である。 Q_b は次のオリフィスモデルで求める。

$$Q_b = \alpha A_b \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_m - p_0)} \quad (8)$$

ここで、 A_b はブリード孔の総面積である。 α は流量係数と呼ばれ、収縮係数 (0.62~0.66) と速度係数 (0.99~0.98) の積で表される。孔形状によるが、本研究では 0.5 とする。

ブリード部直後から輸送管出口について修正ベルヌーイの式を次のように置く。

$$p'_m - p_0 = \lambda_a \frac{L}{D_m} \frac{1}{2} \rho U_m'^2 \quad (9)$$

ここで、 D_m は輸送管内径、 L は輸送管の長さである。 λ_a は輸送管内の管摩擦係数で、滑らかな管として Blasius の式を適用する。

3. 2 固気二相流の解析モデル

3. 2. 1 基礎式

ここでは浮遊流を仮定し、粒子は気流に浮遊して輸送されるものとする。ブリード機構がない装置で粒子を輸送する時の方程式を以下に示す。

検査体積①において、空気と粒子に運動量の保存則を適用すると

$$\begin{aligned} & \rho Q_2 U_2 - \kappa \rho_1 Q_1 U_1 - \rho Q_3 U_3 \\ & + \rho_s (Q_0 - Q_3) (u_{p2} - u_{p3}) \\ & = (p_3 - p_2) A_2 - A_3 \rho_s c_3 g L_e \end{aligned} \quad (10)$$

ホッパーに吸引される空気について、粒子による置換を考慮して連続の式を適用すると

$$Q_0 = Q_3 + \frac{G_s}{\rho_s} \quad (11)$$

ホッパーに吸引される気流のエネルギー式は

$$p_0 - p_3 = \frac{1}{2} \rho \{ (1+k) U_3^2 - U_0^2 \} \cong \frac{1}{2} \rho (1+k) U_3^2 \quad (12)$$

後述のように、 $u_{pm} = u_{p2}$ として、検査体積②において空気と粒子に運動量の保存則を適用すると

$$\rho Q_m U_m - \rho Q_2 U_2 = (p_2 - p_m) A_m - A_m \rho_s c_m g L_2 \quad (13)$$

ブリード部下流の圧力損失は

$$\Delta p = p_m - p_0 = (\lambda_a + m \lambda_z) \frac{L}{D_m} \frac{1}{2} \rho U_m^2 \quad (14)$$

G_s を粒子の質量流量とすれば、粒子の連続の式は

$$G_s = A_3 \rho_s c_3 u_{p3} = A_2 \rho_s c_2 u_{p2} = A_m \rho_s c_m u_{pm} \quad (15)$$

である。

ここで、 Q_0 はホッパーから吸引される空気流量、 ρ_s は粒子の真密度である。 k は損失係数で、空気がホッパー内の粒子間を通過する際の損失であり、層内の粒子の状況や空気速度により変化する。しかし、ホッパーの断面積が A_3 に比べて非常に大きいとすれば、ホッパー内の空気速度は非常に小さく、従って、損失は小さいといえる。しかし、本研究では安全のために $k = 0.5$ とする。

λ_z は負荷圧損係数で、Weber の相関式⁵⁾を用いる。

$$\lambda_z = 4.56 m^{0.6} \left(\frac{U_m}{\sqrt{g D_m}} \right)^{-1.970} \quad (16)$$

G_s は富田ら⁶⁾ のブロータンの供給量の理論式を適用する。これについては、次の節で詳細に述べる。

m はブリード部後の輸送管内の混合比で、次のように与えられる。

$$m = \frac{\rho_s (Q_0 - Q_3)}{\rho Q_2} \quad (17)$$

u_{p3} 、 u_{p2} および u_{pm} は、それぞれノズル入り口、ノズル喉部および輸送管内における粒子速度で、粒子の沈降速度を u_g とし、 u_{p2} を次式で近似する。

$$u_{p2} = \frac{Q_2}{A_2} - u_g \quad (18)$$

さらに $u_{pm} = u_{p2}$ と仮定し、Eq. (11)、Eq. (15) および Eq. (18) から

$$u_{p2} - u_{p3} \cong \frac{Q_2}{A_2} - u_g - \frac{Q_0 - Q_3}{A_3 c_3} \quad (19)$$

と置く。

c_2 、 c_m および c_3 は平均粒子濃度で、ホッパー内の粒子濃度を c_0 として、それぞれ次のように表される。

$$c_2 = \frac{Q_0 - Q_3}{Q_2 - A_2 u_g} \quad (20)$$

$$c_m = \frac{A_2}{A_m} \frac{Q_0 - Q_3}{Q_2 - A_2 u_g} = \frac{A_2}{A_m} c_2 \quad (21)$$

$$c_3 = \frac{1}{2} \left(c_0 + \frac{Q_0 - Q_3}{Q_2 - A_2 u_g} \right) = \frac{1}{2} (c_0 + c_2) \quad (22)$$

ブリード機構がある場合は、Eq. (14) および Eq. (17) の代わりに次の式を用いる。

$$p'_m - p_0 = (\lambda_a + m\lambda_z) \frac{L}{D_m} \frac{1}{2} \rho U'^2_{pm} \quad (23)$$

$$m = \frac{G_s}{A_m \rho U'_{pm}} = \frac{\rho_s (Q_0 - Q_3)}{\rho Q'_{pm}} \quad (24)$$

粒子の連続の式は次のようになる。

$$G_s = A_m \rho_s c_m u_{pm} = A_m \rho_s c'_m u'_{pm} \quad (25)$$

さらに $u'_{pm} = u_{pm}$ と仮定すると、輸送管路内での粒子の濃度は

$$c'_m = c_m \quad (26)$$

である。

3. 2. 2 輸送量の式

固気二相流の場合、粒子の輸送量 G_s の式が必要である。粒子が気流によってノズルに吸い込まれる機構はブロータンクの場合と同じであるので、その場合の式を引用できる⁶⁾。粒子は **Fig. 3** のように、ノズルの入口 O を中心とする半径 r_0 の半球上から、上昇気流により引き込まれるとする。 u_0 を堆積粒子間を通過する空気速度（真の速度）の r_0 の半径上での値とすれば、連続の式から

$$u_0 = \frac{2Q_3}{\pi(D_3 - 1.9d)^2 \varepsilon_0} \quad (27)$$

となる。ここで、 D_3 はノズル吸込み部の直径、 d は粒子の直径、 ε_0 はホッパー内の粒子層の空隙率である。ただし、 r_0 は粒子流の縮流を考慮して

$$r_0 = \frac{1}{2} (D_3 - 1.9d) \quad (28)$$

と置く。 u'_g を粒子群の代表速度、 C'_D を粒子群中の1個の粒子の抵抗係数として

$$u'_g = \sqrt{\frac{4\rho_s g d}{3\rho C'_D}} \quad (29)$$

とすれば、 G_s は以下ようになる。

$u_0 \geq u'_g$ のとき、

Fig. 3 Model of particle flow at nozzle inlet

$$G_s = \frac{\pi r_0^2 \rho_s (1 - \varepsilon_0) u'_g}{u_c^2 / g r_0} \left[-\frac{u_0}{u'_g} + \frac{g r_0}{3 u_c^2} \left\{ \left(\frac{2 u_0^2}{g r_0} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{2 u_0^2}{g r_0} - \frac{2 u_c^2}{g r_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \right] \quad (30)$$

$u_0 < u'_g$ のとき、

$$G_s = \frac{\pi r_0^2 \rho_s (1 - \varepsilon_0) u_0^3}{(u_c^2 / g r_0) u_g'^2} \left[-1 + \frac{1}{3 u_c^2 / g r_0} \times \left\{ \left(1 + \frac{2 u_c^2}{g r_0} \right)^{\frac{3}{2}} - 1 \right\} \right] \quad (31)$$

ここで、

$$u_c = \sqrt{u_g'^2 - \frac{g r_0}{2}} \quad (32)$$

である。

3. 3 計算条件

ノズルの環状スリット径 D_1 は 22mm、喉部径 D_2 は 13.4mm、ノズルの入り口から喉部までの長さ L_1 は 0.052m、ノズル出口からブリード部までの長さ L_2 は 0.3m、噴流の角度 θ は 20° 、輸送管の内径 D_m は 19mm である。

輸送する粒子（ポリメチルメタクリレートペレット）は、直径 d が 3.43mm、真密度 ρ_s が $1,190 \text{ kg/m}^3$

Fig. 4 Comparison between measured and calculated suction flow rate without bleeding holes for air flow alone

である。

空気の密度 ρ は 1.205 kg/m^3 、供給した空気の密度 ρ_1 は実験条件より算出して 4.773 kg/m^3 とする。大気圧 p_0 は $101,325 \text{ Pa}$ とする。なお、計算方法については Appendix に示した。

4. 結果および考察

4.1 インゼクションフィーダーの流体力学特性

4.1.1 ブリード機構がない場合

はじめに、ブリード機構がない場合の気流だけのインゼクションフィーダーの流体力学特性について述べる。

Fig. 4 に、 Q_1 と Q_3 の関係を、 L をパラメーターとして示す。理論と実験結果の一致は、種々の簡素化の仮定を考慮すれば良好といえるが、理論値は実験値より若干大きい。図から明らかなように、 L が大きくなると、 Q_1 を増やしても Q_3 の増加は見られない。 $L = 25 \text{ m}$ のように、ある限界以上の L では Q_1 を増加して

Fig. 5 Comparison between measured and calculated air velocity in pipeline without bleeding holes for air flow alone

Fig. 6 Effect of bleeding holes on suction flow rate for air flow alone

も配管系における圧力損失が増加するため Q_3 の低下を招く。さらに長距離になれば Q_3 は負となり、吸気能力が無くなることは容易に予測できる。つまり、 Q_1 を増やしても吸気能力は向上せず、粉粒体粒子を吸引し輸送することは不可能と考えられる。

Fig. 5 に、 Q_1 と U_m の関係を、 L をパラメーターとして示す。 L が長くなると U_m は減少する。与えられた L について Q_1 の増加により U_m を増やせる。計算値は実験値とほぼ一致している。

4.1.2 吸気性能に及ぼすブリード機構の効果

上述したように、 L が長くなると配管の圧力損失が増加するため、 Q_3 が減少する。そこで、本研究ではノズル排気エアーの一部を外気に流出させるブリード機構を提案している。 Q_b を増加することで U'_m が低下し、配管の圧力損失が小さくなる。これにより Q_3 は増加し、粒子の吸引量も増える。

Fig. 6 および Fig. 7 に、 $Q_1 = 12 \text{ m}^3/\text{h}$ および $Q_1 = 24 \text{ m}^3/\text{h}$ における L と Q_3 および L と U'_m の関係を、 A_b をパラメーターとして示す。 Q_3 は A_b が大きくなるほど増加し、 L が長いほど顕著である。 A_b が大きいほど U'_m は減少するが、その程度は小さい。輸送能力はブリード孔の個数すなわち断面積を変えることにより調整が可能であることを示している。計算結果

Fig. 7 Effect of bleeding holes on air velocity in pipeline for air flow alone

は実験値とよく一致しており、本解析モデルは本装置の流動特性の予測に適用できると判断できる。

上記のように、ブリード機構を設けることにより、管内風速に大きな変化はないが、吸気風量は顕著に増加している。この理由について、計算結果を基に考察する。Fig. 8, Fig. 9 および Fig. 10 に、 $L = 25 \text{ m}$ における、 Q_1 と U'_m 、 Q_1 と Q_b および Q_1 と $p'_m - p_0$ の関係について、 A_b をパラメーターとして示す。 U'_m は A_b が大きくなると低下するが、その程度はわずかで

Fig. 8 Relationship between supply air flow rate and air velocity in pipeline for air flow alone

Fig. 9 Relationship between supply air flow rate and bleeding flow rate for air flow alone

ある。 Q_b は A_b が大きくなるほど増加する。 $p'_m - p_0$ は U'_m の二乗に比例するので、 U'_m の変化よりも大きい。通常は、輸送距離が長くなると圧力損失は大きく変化する。しかし、ブリード機構により輸送管内に入る風量が減少し、風速も減少する。その減少量はわずかであるが、輸送管内の圧力損失の減少に大きく寄与している。この時、ノズルの回復圧力はブリードのない場合よりも低い値となるが、上述したように輸送管内風速は圧力のほぼ $1/2$ 乗に比例するので、輸送管内風速の減少は低く抑えられる。また、管内圧力損失が減少することにより吸引量が増加するが、圧力損失の低下量が大きいほど吸引量は増加する。

4. 2 粒子の輸送量特性

Fig. 11 に、 $Q_1 = 12 \text{ m}^3/\text{h}$ および $Q_1 = 24 \text{ m}^3/\text{h}$ にてポリメチルメタクリレートペレットを輸送した時の G_s の L に対する変化を、 A_b をパラメーターとして示す。実験によると、 G_s は L が長いほど減少するが、 A_b が大きくなると増加している。図中の線は、 $C_b = 0.44$ 、 $\epsilon_0 = 0.6$ として計算したものである。計算値は、 $A_b = 0.353 \text{ cm}^2$ の場合には実験値との差がやや大

Fig. 10 Relationship between supply air flow rate and pressure loss for air flow alone

Fig. 11 Comparison between measured and calculated feeding rate of particles

きいが、 A_b の増加により G_s が増加するという傾向において実験値とよい一致を示している。なお、 $Q_1 = 12 \text{ m}^3/\text{h}$ では、 $A_b = 0.353 \text{ cm}^2$ における $L = 30 \text{ m}$ および $L = 50 \text{ m}$ の輸送は不可能であった。Fig. 4の空気のみが示すように、 L が大きくなると吸気風量が減少し、粒子を吸引できなくなるためといえる。

次に、輸送管が与えられた場合について、インゼクションフィーダーのブリード機構による輸送量の変化をみてる。Fig. 12に、 $L = 15 \text{ m}$ における、 Q_1 と

Fig. 12 Effect of bleeding holes on feeding rate of particles

G_s の関係について、 A_b をパラメーターとして示す。実験では、ブリード機構がない場合には Q_1 を増やしても G_s は増加していない。これに対してブリード機構がある場合には、 A_b が大きいほど、 Q_1 の増加により G_s も増加している。計算ではこの傾向が明らかであり、 $A_b = 0 \text{ cm}^2$ では小さい Q_1 で G_s は飽和に達しているが、 A_b が大きくなるほど、 G_s の飽和が徐々に改善されていることがよく分かる。粉粒体の空気輸送においては、吸引能力の減少という問題が発生することがあるが、ブリード機構によりそれを解決することができ、さらに、ブリード孔の面積により輸送量の調整が可能といえる。

5. 結 言

本研究では、ブリード機構を持つインゼクションフィーダーの流動特性および輸送量特性に関して、理論解析的に研究を行い、前報の実験結果と比較した。その結果、計算値は単相流および固気二相流とも実験値とよく一致し、計算手法の妥当性が確認された。

Appendix

本論文中に記述した理論解析の計算方法を示す。

1. 単相流の計算方法

単相流における理論解析では、3. 2. 1節で示したように、基礎式はEqs. (1)～(9)の9式、未知数は p_m , p'_m , p_2 , p_3 , Q_2 , Q_3 , Q_m , Q'_m , Q_b の9個であるから解くことができる。本研究では以下のように解く。

ブリード機構がある場合、次のように置く。

$$Q_N = \frac{\rho_1 Q_1}{\rho} \quad (\text{A1})$$

$$\zeta_L = 1 + \frac{\lambda_a L}{D_m} \quad (\text{A2})$$

$$\zeta_b = \frac{A_m^2}{a^2 A_b^2} \quad (\text{A3})$$

Eq. (1)を Q_N , Q_3 , Q'_m で表せば、

$$2\kappa \frac{\rho A_m^2}{\rho_1 A_1 A_2} Q_N^2 + 2 \left(\frac{A_m^2}{A_2 A_3} - \frac{A_m^2}{2 A_3^2} \right) Q_3^2 + 2 \left(\frac{A_m}{A_2} - 1 - \frac{A_m^2}{A_2^2} \right) (Q_N + Q_3)^2$$

$$=\zeta_b(Q_N+Q_3)^2\left(1-\frac{Q'_m}{Q_N+Q_3}\right)^2 \quad (\text{A4})$$

となる。Eqs. (6) ~ (9) を整理して Q_N , Q_3 , Q'_m で表せば,

$$(\zeta_b-\zeta_L)Q_m'^2-2\zeta_b(Q_N+Q_3)Q'_m+(1+\zeta_b)(Q_N+Q_3)^2=0 \quad (\text{A5})$$

となる。 $Q_b \geq 0$ であるから、Eq. (A5) を Q'_m について解き、Eq. (7) より、

$$\frac{Q_b}{Q_N+Q_3}=1-\frac{Q'_m}{Q_N+Q_3} \\ =\frac{-\zeta_L+\sqrt{\zeta_b\zeta_L-\zeta_b+\zeta_L}}{\zeta_b-\zeta_L}=\zeta \quad (\text{A6})$$

となる。故に、

$$\frac{Q'_m}{Q_N+Q_3}=\frac{\zeta_b-\sqrt{\zeta_b\zeta_L-\zeta_b+\zeta_L}}{\zeta_b-\zeta_L} \quad (\text{A7})$$

となる。このとき、Eq. (A4) は

$$\left\{\zeta_b\zeta^2+2\left(1+\frac{A_m^2}{A_2^2}-\frac{A_m}{A_2}\right)\right\}(Q_N+Q_3)^2 \\ -2\kappa\frac{\rho A_m^2}{\rho_1 A_1 A_2}Q_N^2-2\left(\frac{A_m^2}{A_2 A_3}-\frac{A_m^2}{2A_3^2}\right)Q_3^2=0 \quad (\text{A8})$$

となる。ここで、

$$\delta=\zeta_b\zeta^2+2\left(1+\frac{A_m^2}{A_2^2}-\frac{A_m}{A_2}\right) \quad (\text{A9})$$

$$\beta=2\kappa\frac{\rho A_m^2}{\rho_1 A_1 A_2} \quad (\text{A10})$$

$$\gamma=2\left(\frac{A_m^2}{A_2 A_3}-\frac{A_m^2}{2A_3^2}\right) \quad (\text{A11})$$

と置けば、Eq. (A8) は、

$$(\delta-\gamma)Q_3^2+2\delta Q_N Q_3+(\delta-\beta)Q_N^2=0 \quad (\text{A12})$$

となる。これを Q_3 について解く。

一方、ブリード機構がない場合は、

$$(\omega-\gamma)Q_3^2+2\omega Q_N Q_3+(\omega-\beta)Q_N^2=0 \quad (\text{A13})$$

となり、これを Q_3 について解く。ここで、

$$\omega=2\left(1+\frac{\lambda_a L}{2D_m}+\frac{A_m^2}{A_2^2}-\frac{A_m}{A_2}\right) \quad (\text{A14})$$

である。

2. 固気二相流の計算方法

ブリード機構がない場合、Eq. (4), Eqs. (10) ~ (13) および Eqs. (19) ~ (22) に Q_3 を与えると Q_2 , Q_0 , $u_{p2}-u_{p3}$, p_3 , p_2 , p_m , c_3 , c_2 , c_m , m が求められる。これにより得られる p_m-p_0 と Eq. (14) から得られる p_m-p_0 とが一致する Q_3 を解とする。同様に、ブリード機構がある場合には未知数 U'_m , Q_b , p'_m を求め、これにより得られる p'_m-p_0 と Eq. (23) から得られる p'_m-p_0 とが一致する Q_3 を解とする。

Nomenclature

A_2 : cross section area of feeder throat	(m ²)	D_3 : diameter of feeder inlet	(m)
A_3 : cross section area of feeder inlet	(m ²)	D_m : diameter of pipeline	(m)
A_m : cross section area of pipeline	(m ²)	d : diameter of particle	(m)
A_b : cross section area of bleeding holes	(m ²)	G_s : feed rate of particles	(kg/h)
C_D : drag coefficient of particle in bulk solids	(-)	g : gravitational acceleration	(m/s ²)
c_0 : particle volume concentration in hopper	(-)	k : coefficient in Eq. (12)	(-)
c_2 : particle volume concentration in feeder throat	(-)	L : length of pipeline	(m)
c_3 : particle volume concentration in feeder inlet	(-)	L_2 : length of pipeline before bleeding holes	(m)
c_m : particle volume concentration in pipeline without bleeding holes	(-)	L_e : length of feeder inlet	(m)
c'_m : particle volume concentration in pipeline with bleeding holes	(-)	m : mass flow rate ratio of particle to air	(-)
D_1 : diameter of feeder annular slit	(m)	p : pressure	(Pa)
D_2 : diameter of feeder throat	(m)	p_0 : atmospheric pressure	(Pa)
		p_2 : pressure in feeder throat	(Pa)
		p_3 : pressure in feeder inlet	(Pa)
		p_m : pressure in pipeline without bleeding holes	(Pa)
		p'_m : pressure in pipeline with bleeding holes	(Pa)

Q_0 : air flow rate in hopper	(m^3/h)	bulk solids	(m/s)
Q_1 : air flow rate in annular slit of feeder	(m^3/h)	u_c : particle velocity in Eq. (32)	(m/s)
Q_2 : air flow rate in feeder throat	(m^3/h)	u_g : terminal settling velocity of particle	(m/s)
Q_3 : suction air flow rate	(m^3/h)	u'_g : particle velocity in Eq. (29)	(m/s)
Q_b : air flow rate in bleeding holes	(m^3/h)	u_{p2} : particle velocity in feeder throat	(m/s)
Q_m : air flow rate in pipeline without bleeding holes	(m^3/h)	u_{p3} : particle velocity in feeder inlet	(m/s)
Q'_m : air flow rate in pipeline with bleeding holes	(m^3/h)	u_{pm} : particle velocity in pipeline without bleeding holes	(m/s)
r_0 : effective radius of feeder inlet	(m)	u'_{pm} : particle velocity in pipeline with bleeding holes	(m/s)
U_0 : mean air velocity in hopper	(m/s)	α : coefficient in Eq. (8)	($-$)
U_1 : mean air velocity in annular slit of feeder	(m/s)	ε_0 : voidage of particles in hopper	($-$)
U_2 : mean air velocity in feeder throat	(m/s)	θ : angle of annular jet in feeder	(degree)
U_3 : mean suction air velocity	(m/s)	κ : coefficient in Eq. (1)	($-$)
U_m : mean air velocity in pipeline without bleeding holes	(m/s)	λ_a : pipe friction factor	($-$)
U'_m : mean air velocity in pipeline with bleeding holes	(m/s)	λ_z : additional pressure loss factor due to particles	($-$)
u_0 : percolating air velocity at feeder inlet in		ρ : air density	(kg/m^3)
		ρ_1 : air density in annular slit	(kg/m^3)
		ρ_s : material density of particle	(kg/m^3)

References

- 1) Jotaki, Y., S. Harada, H. Ishimaru and Y. Tomita : "Injection Feeder for Capsule Conveying (1st Report)", *Japan Soc. Mechanical Engineers*, **750-4**, 105-108 (1975)
- 2) Fujiwara, Y., Y. Tomita and T. Jotaki : "Effect of Air Release in a Pneumatic Capsule Pipeline System", *Trans. JSME Series B*, **55-512**, 967-971 (1989)
- 3) Kimura, H., Y. Takino, H. Ueda, Y. H. Zhao, Y. Tomita, K. Watanabe and K. Horii : "High Performance Spiral Flow Pneumatic Conveying System for Small Diameter Pipelines", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **35**, 548-554 (1998)
- 4) Horii, K. : "Spiral Flow and Its Industrial Applications", *Turbo Machines, Japan*, **22**, 56-64 (1994)
- 5) Weber, M. : "Bulk Solids Handling 11", pp. 99-102 (1991)
- 6) Tomita, Y. and T. Hayashi : "Feed Rate Characteristics of Blow Tank Conveyor", *Trans. JSME Series B*, **50-458**, 2352-2360 (1984)