吹出し管を備えた吸込みノズルの混合比に及ぼす粒径の影響 (第2報, 軸方向の幾何形状を変化させた場合)

Effect of Particle Diameter on Loading Ratio of Suction Nozzle with Injection Pipe (2nd Report, In the Case of Varied Axial Geometric Shapes)

○学 山口 洋和・鹿児島大院 正 高口 裕芝・鹿児島大院 正 福原 稔・鹿児島大

Hirokazu YAMAGUCHI, Kagoshima University Hiroshi KOUGUCHI, Kagoshima University Minoru FUKUHARA, Kagoshima University

正 片野田 洋・鹿児島大

学 矢野 喬寛・鹿児島大院

Hiroshi KATANODA, Kagoshima University

Takahiro YANO, Kagoshima University

Key Words: Multi-phase Flow, Nozzle, Jet, Flow visualization

1. 結論

著者らは円形吸込みノズルの中心軸上に噴流吹出し管を設け、粉体層内の流動化を行い、吸込みノズルの性能を向上させてきた。これまでに幾何学的なパラメータの一つである管径¹⁾、吹出し管挿入長さ²⁾およびノズルの埋め込み深さであるノズル深さ³⁾の影響について調査し、最適な寸法を求めた。ところで、近年、工業的に取り扱う医薬品、食品原料等の粉粒体は、様々な形状のものがあるため、従来の供試粒子で用いられている平均粒径 $60\mu\text{m}$ とは異なる粒径についての上述の影響を解明する必要がある。

本報では、第1報⁴⁾で求めた実験装置の粒径範囲における平均粒径 $46, 60, 181, 256, 375\mu\text{m}$ の5種類の供試粒子を用いて、吹出し管挿入長さ、ノズル深さの軸方向の幾何条件を設定し、粒径の違いが混合比に及ぼす影響について調査した。また、各条件におけるノズル近傍の粉体挙動を可視化実験より確認した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。送風機より送られた噴流が吹出し管③より供試容器⑦内の粉体層⑥に鉛直下方向に吹出される。この噴流により流動化された粉体は、吸込み用送風機により吸込みノズル④から吸込まれ、セパレータ⑧で空気と分離された後、回収タンク⑨に回収され、実験終了後に計量される。なお、供試容器⑦側壁の一つには透明アクリル板を用いている。供試吸込みノズルの概略図を Fig.2 に示す。本装置は可視化実験にも適用されるため、円形吸込みノズルを半割にしたものを透明アクリル板に取り付けた半円筒ノズルを用いた。円筒座標は、吸込みノズル下端から $l_0 = (D_s/2)\tan\theta$ だけ鉛直下方向位置の軸中心を原点とし、鉛直下方向を正とする。吸込みノズルは固定式としているため、ノズル外周に外径 210mm の粉体供給調整器 (Fig.1 - ⑤) を取付け、粉体をノズル内へ連続供給できるようにした。連続供給とは、ノズル下端と沈積粉体表面との距離が一定に保たれ

ていることを意味する。粉体供給調整器の下端から Fig.2 中の角度 θ で表される線分と吸込みノズル外径との交点から、軸方向に対しノズル下端までの距離をノズル深さ h として定義した。ここで、角度 θ は供試粉体の安息角とする。ノズル寸法は、吸込みノズル内径 D_s を 100mm 、吹出し管内径 D_i を 20mm とした。また Fig.2 内斜線部に示すように、吸込みノズル内に半円ドーナツ状のアタッチメント外径 D_a を挿入し吹出し管肉厚比を変更してノズル内流速を上昇させている。肉厚半径 $R_t (= (D_a - D_i)/2)$ を、半径吸込みノズル流路幅 $R_w (= (D_s - D_i)/2)$ で除したものを肉厚比とした。本研究ではノズル内アタッチメント外径 D_a を 80mm としているため、肉厚比 $R_t/R_w = 0.75$ となる。吹出し管挿入長さ比 $l/D_s = 0, 1.0$ および吸込みノズルのノズル深さ比 $h/D_s = 0, 0.3$ とした。実験条件を Table1 に示す。

実験では、各送風機の回転数をインバータにより周波数制御することで、各体積流量をそれぞれオリフィス流量計 (Fig.1 - ②⑩) の差圧より算出した。本報では、粉体回収性能として、混合比 m を用いる。これは粉体の質量流量 G_p と吸込み空気流量の質量流量 G_a との比である。つまり、混合比が高いと高濃度輸送が可能となる。

供試粒子に、平均粒径 $d_p = 46, 60, 85, 181, 256, 375, 675, 1050\mu\text{m}$ (密度 $\rho = 2520\text{kg/m}^3$) の8種類の球形ガラスビーズを用いた。粉体回収時間は粉体が十分に連続供給される範囲とした。

Fig.2 Schematic of suction nozzle

Table 1 Experimental conditions

	l/D_s	h/D_s
Case1	0	0
Case2	0	0.3
Case3	1.0	0
Case4	1.0	0.3

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

3. 実験結果および考察

Case1, 流速比 $U_i/U_s=0$ の条件での各粒径における混合比 m と吸込み空気流速 U_s の関係を Fig.3 に示す. 平均粒径 $d_p=46 \sim 375 \mu\text{m}$ において, 吸込み空気流速 $U_s \approx 5 \text{ m/s}$ で混合比が一定となる飽和状態になっているが, 平均粒径 $d_p=675, 1050 \mu\text{m}$ では飽和状態に達していないことが分かる. これより飽和状態が得られる粒径取得範囲 $d_p=46 \sim 375 \mu\text{m}$ において, 吸込み空気流速 $U_s \approx 5 \text{ m/s}$ を一定とし, Table1 に示す各条件における粒径の影響を調査する.

各条件における混合比 m と流速比 U_i/U_s の関係を Fig.4 に示す. Case1 の場合, 混合比は流速比を大きくすると, 流速比 6 付近までは高い値を示しているが, それ以上流速比を大きくすると減少する. これは, 吹出し流が粉体を流動化させるが, さらに流速比を大きくすると, 吹出し流により吸込みノズル内に流入する粉体を阻害してしまい, 管外に飛散させるからである. Case2 の場合, すなわちノズル深さを付加すると, 混合比が増加している. これは粉体供給量が増加することで混合比が増加するノズル深さの特徴を示している. Case3 の場合, すなわち吹出し管挿入長さを付加すると, 混合比が増加している. これは, 鉛直下方向の粉体を流動化させるため, 混合比が増加する吹出し管挿入長さの特徴を示している. Case4 は, Case3 と同様の傾向を示している. この分布の傾向は過去の研究³⁾で明らかにされている. Case 番号が大きくなるにつれて, 低流速比域におけるプロット点が減少する. これは, ノズル深さが大きくなるとノズル端面にかかる粉体の圧力が高くなるため, 大きな吹出し流量が必要になるためである. また, 挿入長さを追加するとこの傾向は強くなり, Case3, 4 における平均粒径 $d_p=375 \mu\text{m}$ のプロットが出来なかった. 流速比の影響を受ける可能性があるため十分とはいえないが, 得られた範囲内の結果を用いて, 各流速比における粒径の影響を調査する.

粒径の影響を定量的に調べるため, 各条件, 流速比 U_i/U_s 一定における混合比 m と粒径 d_p の関係を Fig.5 に示す. Case1, 2 の場合には, 流速比 $U_i/U_s=6$ において, Case3, 4 の場合には, 流速比 $U_i/U_s=8.5$ のデータをプロットしている. Case1, 2 の場合には, 粒径が大きくなっても混合比の値はあまり変化しないことが分かる. また Case3, 4 の場合では, 粒径が大きくなるにつれ若干の増加傾向を示すが, プロット点が少なく, 測定条件が十分ではないため, 今後明らかにしていく必要がある.

上述した混合比の傾向を明らかにするため, Case2 の条件を抽出して, 平均粒径 $d_p=60, 256 \mu\text{m}$ における吸込みノズル近傍の可視化画像を Fig.6(a), (b) に示す. 粉体と空気の流動境界に, 粒径の違いによる粉体挙動の差異は, あまり見られなかった. よって可視化画像から, 軸方向の幾何形状を変化させても, 粒径の影響はあまりないことが確認できた.

今後, 吸込み空気流量が確保できるよう装置を改良することで, 十分なプロット点を確保する. また, 圧力損失を測定し, ノズル効率を求め, ノズル性能に及ぼす粒径の影響について明らかにしていく予定である.

4. 結論

吹出し管を備えた吸込みノズルの混合比に及ぼす粒径の影響について, 肉厚比 $R_i/R_w=0.75$ において軸方向幾何条件を 4 条件設定し, 異なる 5 つの平均粒径を用いた場合の性能実験およびノズル近傍の可視化実験を行った. 得られた結論を以下に示す.

- 1) 全ての条件において粒径の違いが混合比に及ぼす影響はあまり見られない.

- 2) 上述の混合比の傾向を吸込みノズル近傍の可視化画像から明らかにした. すなわち, 流動境界が変化しないため, 混合比が変わらないことを裏付けた.

参考文献

- 1) 福原・他 5 名, 粉体工学会誌, 44(2007), 790-797.
- 2) 福原・他 6 名, 粉体工学会誌, 46(2009), 90-97.
- 3) 福原・他 6 名, 粉体工学会誌, 49(2012), 92-99.
- 4) 高口・他 4 名, 日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会, 191(2013), 発表予定.

Fig.3 Relations between loading ratio and velocity in suction nozzle

Fig.4 Relations between loading ratio and velocity ratio

Fig.5 Relations between loading ratio and particle diameter

Fig.6 Visualization image of powders (Case2, $U_s=5.07 \text{ m/s}$, $U_i/U_s=6$)