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3報, 吹出し管肉厚を変化させた場合)

Effect of Particle Diameter on Loading Ratio of Suction Nozzle with Injection Pipe (3rd Report, In the Case of Varied Thickness of Injection Pipe)

○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。第2報⁴⁾で上述の吹出し管挿入長さ、ノズル深さの軸方向幾何条件の影響について調査した。

本報では、第1報⁵⁾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、吹出し管肉厚を変化させ、半径方向の幾何条件の変化がノズル性能に及ぼす粒径の影響について調査した。さらにノズル深さの軸方向の幾何条件を組み合わせ、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。肉厚比 R_t/R_w を大きくするとノズル内断面積が小さくなり、大きな吸込み流速が得られる。本研究ではアタッチメント D_a を変化させ、肉厚比 $R_t/R_w = 0.025, 0.500, 0.750, 0.875$ としている。また、吸込みノズルのノズル深さ比 $h/D_s = 0, 0.3$ とした。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 - ②⑪) の差圧より算出した。粉体回収性能のうち、混合比 m を使用している。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 $d_p = 46, 60, 181, 256, 375\mu\text{m}$ (密度 $\rho = 2520\text{kg/m}^3$) の5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。

3. 実験結果および考察

平均粒径 $d_p = 60\mu\text{m}$ 、流速比 $U_i/U_s = 0$ 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。各肉厚比のノズル流速の最大値を Fig.3 内に細い矢印で示す。これまでの実験条件である肉厚比 $R_t/R_w = 0.025$ では混合比 m の飽和領域は得られなかったが、肉厚比を大きくすることで、飽和領域が生じ

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

Fig.2 Schematic of suction nozzle

た. 例として, 肉厚比 $R_t/R_w=0.500$ における, 混合比の開始流速 U_{s1} , 飽和流速 U_{s2} を Fig.3 内に太い矢印で示す. 肉厚比 R_t/R_w が大きくなると開始流速 U_{s1} , 飽和流速 U_{s2} が大きくなるが, 混合比は減少していることが確認できる. これらの特性は, 肉厚比 R_t/R_w を大きくすることによるノズル入口圧力損失の増大により生じる影響であると考えられる.

各粒径においても, 同じ様に実験を行い, 開始流速 U_{s1} , 飽和流速 U_{s2} を求め, 肉厚比に及ぼす粒径の影響を調査した. その結果を Fig.4 に示す. これより, 全粒径において, 肉厚比 R_t/R_w を大きくすると開始流速 U_{s1} , 飽和流速 U_{s2} が急激に増加したことが確認できる. また, 粒径の影響についてはあまり見られない. そのため, 平均粒径 $60\mu\text{m}$ を代表粒径として抽出し, 肉厚比とノズル深さ比の関係性を調査した.

平均粒径 $d_p=60\mu\text{m}$, ノズル深さ比 $h/D_s=0.3$ における混合比 m と流量比 Q_i/Q_s の関係を Fig.5 に示す. これより, 全条件において, 流量比を変化させても同様な傾向を示していることが分かる.

肉厚比 R_t/R_w の影響を定量的に調べるため, 流量比 $Q_i/Q_s=0.7$ における混合比と肉厚比 R_t/R_w の関係を Fig.6 に示す. 全ての条件において肉厚比 R_t/R_w が大きくなると混合比が減少する傾向を示した.

上述した混合比の傾向を明らかにするため, 混合比変化の大きい, ノズル深さ比 $h/D_s=0.3$, 肉厚比 $R_t/R_w=0.500, 0.875$ の 2 点における吸込みノズル近傍の可視化画像を撮影した. その結果を Fig.7 に示す. Fig.7(a)では吹出し流で流動化された粉体が吸込みノズル内に流入しているが, Fig.7(b)の場合, 流動境界が半径方向に拡大しているのが観察できる. これは吹出し流により流動化された粉体が吸込みノズル内アタッチメントの干渉を受けることで, 吸込みノズル内へ供給されにくくなることを示していると考えられる. これより, 肉厚比 R_t/R_w が大きくなるにつれ流動境界に変化が生じ, 混合比が減少する挙動を確認した.

今後, 第 1~3 報の内容を踏まえ実験装置の改良を行い,

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

Fig.4 Relations between velocity in suction nozzle and thickness ratio

吹出しと吸込みの圧力損失を測定し, 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空気輸送特性に及ぼす平均粒径の影響について, 吹出し管肉厚比, 幾何条件および流動条件を変化させ, 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) 吹出し流を付加しない場合には, 肉厚比が大きくなるとノズル流速は大きくなるにもかかわらず, 開始, 飽和流速が大きくなり, 混合比は減少する.
- 2) 吹出し流, ノズル深さ比を付加した場合でも, 肉厚比が大きくなるにつれ, 混合比は減少する.
- 3) 上記 2) 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, 肉厚比が大きくなるにつれ流動境界に変化が生じ, 混合比が減少する挙動を確認した.

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) 山口・他 4 名, 日本機械学会九州支部第 66 期総会・講演会, 188(2013), 発表予定.
- 5) 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.5 Relations loading ratio and flow rate ratio

Fig.6 Relations loading ratio and thickness ratio

(a) $R_t/R_w=0.500$

(b) $R_t/R_w=0.875$

Fig.7 Visualization image of powders($h/D_s=0.3, Q_i/Q_s=0.7$)