413 自由落下粒子群の落下速度の増加に及ぼす粒子物性や空気の影響

Effect of Particle Properties and Entrained Air for Increasing Velocity of Free Falling Particles

○正 尾形 公一郎 (九工大SVBL), 正 富田 侑嗣 (九工大)

Koichiro OGATA and Yuji TOMITA, Kyushu Institute of Technology, 1-1 Sensui-cho, Tobata, Kitakyushu

1. 緒言

重力により孔から排出される粒子群の自由落下運動は種々の粉体操作で用いられている。この流れ場は、落下中に周囲空気や粒子間衝突などの影響を受けて単一粒子と異なる流動を示すことから、粒子間、粒子-流体間相互作用の基礎研究として非常に興味深い現象である。そこで、筆者らは孔からの粒子群の落下速度特性に着目して研究を行ってきた。これらの研究から、粒子群は内部に下降気流を生成し、この気流と相対的に自由落下するため、静止空気中の単一粒子の沈降速度より増加することが分かった⁽¹⁾⁻⁽³⁾。さらに、同一の密度、質量流量で粒子直径が小さい場合の実験から、粒子群の中心軸上速度はある落下距離において最大値に達し、その後沈降速度に向かって減速する結果が得られた⁽⁴⁾。粒子群の落下速度には気流速度や粒子物性が相互に影響すると考えられる。そこで、本研究では数値計算を用いて、同一密度、質量流量で粒子直径のみを変化させた場合の粒子群や気流の中心軸上速度、数密度や落下中の粒子に作用する力の変化を調べて、自由落下粒子群の落下速度の増加に及ぼすこれらの影響を検討する。

2. 数値解析モデル

本研究では、粒子と流体の密度比が 10^3 以上と大きい固気二相流なので、仮想質量力などは無視し、体積力は重力のみを考慮した。表面力は気流との相対速度を基準とし、抗力と横方向力を考慮した。流れのせん断による横方向力のSaffman力は、Meiによる修正式(2)を使用した。本計算で使用した粒子間衝突判断及び処理は既報⁽⁵⁾⁽⁶⁾と同じである。粒子運動は直角座標系で計算し、オリフィスから鉛直下向きに z 軸を取れば、粒子の並進運動の式は次のようになる。

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3\rho_a V_r}{4\rho_p d_p} \left[C_D(u-v) + \frac{C_{LM}}{|\omega|} (u-v) \times \omega + \beta \frac{2v_i^{1/2}}{\pi |\Omega|^{1/2} V_r} C_{LS}(u-v) \times \Omega \right] + g \quad (1)$$

$$\beta = \left(1 - 0.3314\alpha^{1/2}\right) \exp\left(-\frac{Re_p}{10}\right) + 0.3314\alpha^{1/2} \quad (Re_p \leq 40) \quad (2)$$

$$\beta = 0.0524(\alpha Re_p)^{1/2} \quad (Re_p > 40)$$

$$\alpha = \frac{\left|\frac{\partial u_z}{\partial r}\right| \frac{d_p}{2}}{|u_z - v_z|} \quad (Re_p > 40)$$

ここで、 u は気流の平均速度、 ρ_a は空気密度、 V_r は粒子と気流の相対速度、 C_D は抗力係数、 C_{LM} は自転による揚力係数、 C_{LS} はSaffman揚力の係数、 Re_p は粒子レイノルズ数、 ω は粒子の角速度、 Ω は渦度である。落下中の粒子群は他粒子との衝突などにより回転する。自由飛行中、粒子の回転は気流の影響を受けるが、ここでは、粘性による減衰のみを考慮し、Dennisらによる次式を使用した。

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{-15\rho_a |\omega_r| \omega_r}{16\pi\rho_p} \left(\frac{C_1}{\sqrt{R_\omega}} + \frac{C_2}{R_\omega} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\omega_r = (1/2)\Omega - \omega$ 、 $R_\omega = d_p^2 |\omega| / 4\nu_i$ であり、 C_1 、 C_2 はDennisらによる値でそれぞれ、6.45、32.1とした。

気流は等温、定常、軸対称、非圧縮性流れと仮定した。粒子の影響はソース項の形で抗力のみを考慮した。乱流渦動粘度は $k-\epsilon$ モデルで計算する。気流の計算方法や係数の詳細は既

報⁽⁷⁾⁽⁸⁾と同一である。

3. 計算条件

計算は円筒状の計算領域内を粒子群が自由落下するとした。計算領域や気流の分割数は既報⁽⁹⁾と同一である。計算時間は粒子投入から3秒間とした。また、粒子群の中心軸上落下速度などの各平均値は2秒から3秒の1秒間で算出した。オリフィス出口部の初速度は実験値を使って0.767m/sとした。Table 1に本計算で使用した粒子物性を示す。ここで、 d_p は粒子の平均直径、 σ_p は幾何標準偏差、 ρ_p は真密度、 v_i は沈降速度、 D はオリフィス直径で m_p は質量流量である。また、 m_p や ρ_p 、 σ_p はポリスチレン粒子による実験値(PSM粒子)と同一とした。このため、他の粒子の D はBeverlooらの相関式から算出した。本研究では、 d_p のみを変化させて、粒子群の落下速度に対する影響を調査する。

Table 1 Particle properties and mass flow rate of particles.

	d_p (μm)	σ_p (-)	ρ_p (kg/m^3)	v_i (m/s)	D (mm)	m_p (g/s)
PSS	600	0.128	1068	2.56	5.78	2.01
PSM	944	0.128	1068	3.89	6	2.01
PSL	1300	0.128	1068	5.13	6.76	2.01

4. 結果と考察

Fig.1に、各粒子の中心軸上速度 v_{zmax} と落下距離 z の関係を示す。ここで、 m_p は2.01g/sであり、縦軸は v_i で、横軸は D で無次元化した。図中の実線は流体抵抗を無視した場合の単一粒子の自由落下速度 $v_g = \sqrt{2gz}$ を v_i により無次元化したものである。図より、PSM粒子の計算値は実験値とほぼ一致する。このため、本解析モデルで粒子群の自由落下運動をある程度再現できるといえる。全ての粒子の v_{zmax}/v_i は z/D が小さい領域で v_g/v_i とほぼ等しく、 z/D が大きくなると、 v_g/v_i から離れる傾向を示す。本条件での、 v_{zmax}/v_i は、PSL粒子とPSM粒子の場合には一定値に、また、PSS粒子はある z/D で最大値を取った後、 v_i に向かって減速する傾向が見られた。さらに、 v_{zmax}/v_i は d_p が小さいものほど増加する傾向を示した。これらの結果は、ガラスビーズによる実験値⁽⁴⁾と同様である。

粒子群の落下速度に対する気流速度の影響を考える。Figs.2, 3に、PSM粒子とPSS粒子の中心軸上速度と落下距離の関係を示す。図中の縦軸は v_{zmax} 、 u_{zmax} 、 v_g を v_i により無次元化した。 u_{zmax} は気流の中心軸上速度である。Fig.2より、PSM粒子の z/D に対する v_{zmax}/v_i は z/D の増加とともに増加し、ある一定値に漸近するような傾向を示す。 u_{zmax}/v_i はある一定値に達した後、急速に z 方向に減少することが分かる。一方、Fig.3のPSS粒子の z/D に対する v_{zmax}/v_i 、 u_{zmax}/v_i の変化は、それぞれ、 z/D の増加とともに増加し、ある一定値に達した後減少する傾向を示している。 v_{zmax}/v_i の減速は、既報⁽¹⁰⁾で述べたように、粒子に作用する加速度が負の値を取るためであるといえる。ここで、両粒子の u_{zmax}/v_i を比較すると、 d_p が小さいPSS粒子が大きいことが分かる。自由落下する粒子群は気流

とともに相対的に落下するため、 u_{zmax}/v_t の大きいPSS粒子の v_{zmax}/v_t が増加したと考えられる。

次に、粒子群に誘起された気流速度の増加について検討する。本計算では、粒子が気流に与える力を単位体積あたりの抗力でモデル化している。そこで、各位置で粒子に作用する力を調べることで、気流速度の変化を知ることが出来るといえる。Fig.4に、中心軸上の粒子群に作用する力 F_p 、抗力 F_d と落下距離の関係を示す。ここで、 F_d は $-F_g$ をプロットし、 z 方向に作用するMagnus力やSaffman力は無視できるほど小さいため、省略した。図中の縦軸は、各位置での粒子群の自重による力 F_g で無次元化した。図より、各粒子の F_d/F_g は z/D の増加とともに増加し、結果的に F_g とバランスする傾向が見られた。また、 F_p/F_g は F_d/F_g と逆の傾向を示し、0に近づくことが分かった。ここで、 F_d に対する d_p の影響を見ると、 d_p の小さいものほど F_d/F_g が急速に増加することが分かる。このため、粒子群が気流に与える力が増加し、気流速度は大きくなる。故に、中心軸上の下降気流の増加によって、粒子の速度も大きくなるといえる。従って、 d_p の小さいPSS粒子の v_{zmax}/v_t が大きくなったといえる。

粒子群が気流に与える力には、粒子群の数密度（単位体積あたりの粒子個数）が影響する。そこで、各粒子に対する数密度を調べて、気流に与える力の変化を検討する。Fig.5に、粒子群の中心軸上数密度 n_{max} と落下距離の関係を示す。図より、各粒子の n_{max} は z/D の増加とともに急速に減少し、ある一定値に漸近する傾向を示した。また、 d_p の小さいものほど n_{max}

が増加することが明らかとなった。このため、 n_{max} が大きい、PSS粒子が気流に与える力が増加したものと考えられる。

5. 結言

同一密度、質量流量で粒子直径のみを変化させた場合の粒子群の中心軸上速度に対する気流速度や数密度、粒子に作用する力の影響を数値計算によって調べた。

これらの結果から、粒子群の単一粒子の沈降速度に対する中心軸上速度は粒子直径の小さいものほど増加することが明らかとなった。これは、粒子直径が小さい場合に、粒子群が気流に与える力や数密度が増加するため、気流速度が増加し、この気流とともに粒子群が相対的に落下することが原因であると考えられる。

参考文献

- (1) 尾形・船津・富田, 機論, 65-633, B(1999), 1629-1635.
- (2) 尾形・船津・富田, 粉体工学学会誌, 37-3, (2000), 160-167.
- (3) Ogata, K., K. Funatsu, Y. Tomita, Powder Tech., 115, (2001), 90-95.
- (4) Ogata, K., Y. Tomita, WCPT4(CD-ROM), Sydney, (2002), No.154.
- (5) 田代・富田, 機論, 56-526, B(1990), 1611-1614.
- (6) 田代・富田, 機論, 61-589, B(1995), 3210-3214.
- (7) 彭・田代・富田, 機論, 63-612, B(1997), 2645-2651.
- (8) 尾形・川浪・船津・富田, 機講論, No.018-1, (2001), 73-74.
- (9) 尾形・富田, 日本混相流学会2001講演論文集, (2001), 83-84.
- (10) 尾形・富田, 日本混相流学会2002講演論文集, (2002), 177-178.

Fig.1 Relation between v_{zmax}/v_t and z/D .

Fig.2 Relation among v_{zmax}/v_t , u_{zmax}/v_t and z/D of PSM particles.

Fig.3 Relation among v_{zmax}/v_t , u_{zmax}/v_t and z/D of PSS particles.

Fig.4 Dimensionless center-line force act on free falling particles.

Fig.5 Relation between number density of particles and falling distance.