自由落下粉体ジェットの落下速度に及ぼす粒子物性の影響*

尾形 公一郎^{*1}, 川 浪 秀 浩^{*2}
船 津 勝 也^{*3}, 富 田 侑 嗣^{*3}

Effect of Particle Properties on Falling Velocity of Powder Jet

Koichiro OGATA^{*4}, Hidehiro KAWANAMI,
Katsuya FUNATSU and Yuji TOMITA^{*4} Department of Electronic and Mechanical Engineering, Oshima National College of Maritime Technology,
1091-1 Komatsu, Oshima-cho, Oshima-gun, Yamaguchi, 742-2193 Japan

We measured the velocity and number density of powder jet falling from a hopper by using a phase Doppler anemometer and obtained the following results. The center line velocity of powder jet near the hopper exit is close to the free falling velocity of a single particle in disregard of the fluid drag, which is independent of the diameter, density and mass flow rate of particle, and far from the exit tends to approach the terminal settling velocity of a single particle. When the particle diameter is small and the mass flow rate is increased, the ratio of the center line velocity to the terminal velocity increases. The axial fluctuation velocity profile of powder jet takes a minimum at the jet axis and after taking a maximum decreases toward the outer edge. The profile becomes flat when the mass flow rate is small and the falling distance is increased. The number density profile takes a maximum near the jet axis and rapidly decreases toward the outer edge. The center line number density of the small particle is larger than that of the large particle. It is inferred that the dimensionless mass flow rate of the entrained air is increased with increasing the falling distance, being independent of particle size and density.

Key Words: Multi-phase Flow, Powder Jet, Entrained Air, Falling Velocity, Particle Diameter, Particle Density, Mass Flow Rate, Phase Doppler Anemometer

1. 序 論

粒子のホッパーからの重力による排出は空気輸送、粉体のハンドリングや化学プロセスにおいて広範囲に用いられている。この粒子流(以下、粉体ジェットと呼ぶ)は、粒子群周りの静止空気に流動を引き起こし、粉体ジェット内部に空気を巻き込む⁽¹⁾。このため、粉体ジェットは単一粒子とは異なる流動を示す。また、粉体が空気を含むことは、種々の単位操作において、トラブルの原因ともなりうる。そのため、粉体ジェットへの空気の巻き込み流量についてのいくつかの研究がある⁽²⁾⁻⁽³⁾。これらの研究では粉体ジェットや誘起される気流の流動構造を単純化して巻き込み流量の予測モ

デルを提案している。また、本現象と類似の問題として、流動層中の壁面付近で発生する粒子クラスターの落下速度⁽⁴⁾に関する研究がある。

筆者らは、自由落下する粉体ジェットと気流の流動構造を調べるために、平均粒子直径が約454 μm のガラスビーズの粉体ジェットの落下速度をレーザードップラー流速計(L.D.V.)を用いて測定した⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾。さらに、位相ドップラー流速計(P.D.A.)を用いて、落下距離が大きい位置で粉体ジェットに誘起される気流の軸方向速度の測定を行った⁽⁷⁾。これらの研究から、粉体ジェットはジェット内部に下降気流を形成し、この気流に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速くなることを明らかにした。

粉体ジェットの自由落下運動でも、単一粒子と同様に、落下距離の増加とともに落下速度は増加するが、粒子間衝突や空気の巻き込みによって横方向にゆっくりと拡散する。そして、粒子濃度は希薄となり、落下状態は単一粒子の運動に近づくと考えられる。しかしながら、比較的大きい粒子の実験⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾では、このこと

* 原稿受付 2003 年 3 月 10 日。

^{*1} 正員, 大島商船高等専門学校(〒742-2193 山口県大島郡大島町小松 1091-1)。^{*2} 九州工業大学大学院工学研究科[現: JFE スチール(株)]。^{*3} 正員, 九州工業大学工学部(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)。

E-mail: ogata@oshima-k.ac.jp

を確認するに至らなかった。これは、測定領域が十分長くなかったためと考えられる。そこで、本研究では粒子直径や粒子密度、質量流量を変えることで落下速度の挙動を実験的に調べ、さらに、空気の巻き込みに及ぼす影響を検討する。

2. 実験装置及び方法

2・1 実験装置及び測定方法 図1に本研究で使用した実験装置の概略を示す。粉体供給用ホッパーは上部と下部の2つで構成した。上部ホッパーは内径490mm、高さ1000mm、下部ホッパーとして内径80mm、高さ180mmと580mmの透明アクリル製円形容器を用いた。ここで、円錐角は両者ともに60°である。下部ホッパーの詳細図を図1中に示す。

ホッパーに充てんされた粉体は下部ホッパー底部の長さ30mmの円形オリフィスを通して自由落下する。粉体ジェットの各位置での落下速度や数密度はP.D.A.を使用して測定した。レーザー測定用の送光用プローブと受光用レシーバの焦点距離はそれぞれ400mmと600mmである。本実験の測定範囲は落下距離 z について30mmから2100mm、半径方向距離 r については中心軸から左右150mmである。ここで、 z の原点は下部ホッパー底部出口端からの距離とした。レーザーの測定体積内を通過する粒子群からの信号は信号処理器により処理され、速度と粒子径の測定値はパーソナルコンピュータに記録される。また、回収器に設置した圧縮型ロードセルによって、落下粉体の質量を時間的に記録して、粉体の質量流量 m_p を求めた。

2・2 粒子の特性 表1に本研究で使用した粒子の物性を示す。ここで、 d_p は平均粒子直径、 σ_p は幾何標準偏差、 ρ_p は粒子真密度を表す。 v_t は各粒子の単一粒子の終末沈降速度であり、計算で求めた。以下、本文中では d_p が454 μm 、207 μm のガラスビーズ粒子をLG粒子、SG粒子、944 μm のポリスチレン粒子をPS粒

子と呼ぶ。粉体の質量流量 m_p はホッパーのオリフィス直径を変えて調節した。表2にオリフィス直径 D と各粉体の m_p の関係を示す。ここで、LG粒子とSG粒子の m_p はほぼ同じになるように調整した。

3. 結果と考察

3・1 粉体ジェットの中心軸上速度 図2

～4に、各粒子群の中心軸上速度 v_{zmax} と落下距離 z の関係を示す。図2は、既報^{(5)・(6)}で示したLG粒子の結果であり、他粒子と比較するためのものである。ここで、縦軸はそれぞれの単一粒子の終末沈降速度 v_t で、横軸は D で無次元化し、各図とも m_p をパラメータとした。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 $v_k = \sqrt{2gz}$ を v_t で無次元化したもの、点線は単一粒子の落下速度 v_s を v_t により無次元化したものである。

図2～4より、 v_{zmax}/v_t は z/D が小さい場合、 d_p や ρ_p などの粒子物性や m_p に依存せず v_k/v_t とほぼ一致することが分かる。各粒子について、 v_{zmax}/v_t が v_k/v_t で近似できる z/D は、LG粒子では $z/D=180\sim 220$ 、SG粒子では $z/D=200\sim 260$ 、PS粒子では $z/D=55\sim 85$ であり、 m_p の増加とともに増加する傾向を示す。この領域では粒子と気流の速度差が小さいことをLG粒子に対する実験によって確認している⁽⁸⁾。これは、中心軸上を下降する空気が粒子群とほぼ一体となって運動していることを示している。このため、相対速度に起因した流体抵抗が極めて小さく、 v_{zmax} は v_k にほぼ等しくなると推測できる。

z/D が大きくなると、 v_{zmax}/v_t は v_k/v_t から離れ、小さくなる傾向を示す。本実験条件では v_{zmax}/v_t の最大値はLG粒子に対して1.4から1.8、SG粒子に対して2.6から4.2、PS粒子に対して1.0から1.2程度となり、 m_p や v_t が同じでも、 d_p が小さいものほど大きい。また、各粒子と

Table 1 Particle properties

	d_p (μm)	σ_p (-)	ρ_p (kg/m^3)	v_t (m/s)
LG	454	0.116	2590	3.49
SG	207	0.090	2544	1.47
PS	944	0.128	1068	3.89

Table 2 Relation between m_p and D

LG particles		SG particles		PS particles	
D (mm)	m_p (g/s)	D (mm)	m_p (g/s)	D (mm)	m_p (g/s)
4	1.58	3.5	1.65	6	2.01
6	5.80	5.5	5.65	8	4.44
8	12.4	7.3	12.3	10	8.21

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Relation between v_{zmax}/v_t and z/D of LG particles Fig.4 Relation between v_{zmax}/v_t and z/D of PS particles

も、 m_p の増加とともに v_{zmax}/v_t の最大値は増加している。

まず、 d_p のみが異なるLG粒子とSG粒子を比較する。図2, 3中の m_p が1.58g/sと1.65g/sの場合の z/D が250付近を考える。この時、SG粒子の v_{zmax}/v_t はLG粒子より2.3倍程度大きいことが分かる。筆者らの以前の研究から、 z が大きいところでの粉体ジェットの落下速度 v_{zmax} はほぼ $v_s + u_{zmax}$ で近似できることを述べた⁽⁵⁾。ここで、 u_{zmax} は気流の中心軸上速度、 v_s は単一粒子の z での落下速度である。この関係から、SG粒子の u_{zmax} はLG粒子のものより大きいと推測できる。

次に、 d_p や ρ_p は異なるが、 v_t がほぼ同じLG粒子とPS粒子を比較する。SG粒子とLG粒子の比較の場合と同様に、 z/D が250付近を考え、 m_p は1.58g/sと2.01g/sとする。この時、LG粒子の v_{zmax}/v_t はPS粒子より1.2倍程度大きいことが分かる。この場合も、前述と同様に、LG粒子の u_{zmax} がPS粒子より大きいと推測できる。さらに、全ての粒子において、 m_p の増加とともに u_{zmax}

Fig.3 Relation between v_{zmax}/v_t and z/D of SG particles

も増加すると考えられる。

ここで、 u_{zmax} の増加について考える。これまでの結果から、 u_{zmax} は d_p が小さいものや m_p が大きい場合に増加する。 u_{zmax} の増加は粉体ジェットの流体抵抗の増加による。単位体積あたりの流体抵抗 F は、粒子と気流の相対速度や粒子の数密度 n が影響する。 n は d_p の減少や m_p の増加によって増加する。 m_p と相対速度が同じとすれば、 d_p の小さい粒子では F は増加し、気流速度は大きくなる。故に、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。また、 d_p が同じで m_p が大きい場合も同様に流体抵抗が増加し、気流速度が増加するといえる。従って、 v_{zmax}/v_t は m_p が同じであれば小さい粒子で増加し、また、同じ粒子では m_p が大きくなると増加するといえる。ここで、 m_p が同じで d_p を変化させた場合の数値解析から同様の結果が得られている⁽⁹⁾。

単一粒子の落下速度 v_s は z に対して単調増加し、終末沈降速度に漸近する。しかしながら、図3のSG粒子では v_{zmax} はある z で最大となった後 v_t に向かって減速する傾向を示す。これは、粉体ジェットにより形成された下降気流が粉体ジェットよりも速く拡散し、その速度を減衰させ、粒子に作用する流体抵抗が増加するためと考えられる。LG粒子の実験から、 u_{zmax} は z 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た⁽⁷⁾。故に、SG粒子についても u_{zmax} は同様の流動を有すると考えられる。ここで、 v_{zmax} の最大値からの減速領域において、流体抵抗が増加し、粒子に作用する力が負になるとすれば、粒子速度が減速すると推測できる。また、その後、粒子に作用する力は回復し、0に漸近すると考えられる。すなわち、粒子群の自重による力と流体抵抗がほぼ等しくなるといえる。これらの結果から、 z の増加や m_p の減少によって、

Fig.5 (a) Dimensionless axial velocity profiles of SG particles for $m_p=1.65\text{g/s}$

Fig.5 (b) Dimensionless axial velocity profiles of SG particles for $m_p=5.65\text{g/s}$

Fig.5 (c) Dimensionless axial velocity profiles of SG particles for $m_p=12.3\text{g/s}$

Fig.6 (a) Dimensionless axial fluctuation velocity profiles of SG particles from the orifice for $m_p=1.65\text{g/s}$

$v_{z\text{max}}$ は最終的に単一粒子の終末沈降速度に減速すると考えられる。LG 粒子や PS 粒子の場合でも、前述と同様に、 z の増加とともに $v_{z\text{max}}$ は v_g に近づくと思われる。

3・2 粉体ジェットの軸方向速度分布 LG 粒子による以前の研究において、筆者らは z が 180mm 以下の粉体ジェットの軸方向速度分布が中心軸付近ではほぼ一様で、単相乱流ジェットの混合層での速度分布と同様であること、さらに、オリフィスからの距離が増加すると一様速度の領域が減少し、中心軸にピークを持つ速度分布に発達することを明らかにした⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾。

図 5(a)～(c) に、 z/D をパラメータとして、SG 粒子の軸方向速度分布を示す。ここで、 m_p は 1.65g/s, 5.65g/s, 12.3g/s とした。縦軸は v_z 、横軸は D により無次元化している。点線は各位置 z/D での単一粒子の v_z/v_g を表す。

各図から、 $v_{z\text{max}}$ が v_g にほぼ等しい z/D では、粉体ジェッ

トの中心付近での v_z が z/D に依存せずほぼ相似の分布形となっている。ここで、中心軸付近の僅かな領域では、粒子速度は v_g を基準に考えることができるといえる。 r/D が大きくなると、LG 粒子と同様に⁽⁵⁾⁻⁽⁶⁾、 v_z は v_g に近づき、さらに、 v_g より僅かに小さくなっている。これは、落下中の流体抵抗の増加や粒子間衝突などによって粒子速度が減速したものと考えられる。一方、 $v_{z\text{max}}$ が v_g から離れる z/D の領域(図 5(a)中の $z/D=294.3, 437.1$)では、 v_z/v_g は z/D の増加とともに減少する。これは、前述のように、気流速度が減少し、粉体ジェットに作用する流体抵抗が増大したためと推測できる。また、速度分布形から z/D の増加とともに粉体ジェットの拡がりが増加する傾向を示している。粉体ジェットの横方向への拡がりには主に粒子間衝突が原因であることを数値解析⁽¹⁰⁾により確認している。

Fig.6 (b) Dimensionless axial fluctuation velocity profiles of SG particles for $m_p = 5.65 \text{ g/s}$

図 6 (a) ~ (c) に、SG 粒子の軸方向変動速度分布を示す。ここで、両軸ともに図 5 と同じ無次元化を行い、 m_p と z/D も同一である。各図から、 $v_{z \max}$ が v_g にはほぼ等しい z/D での変動速度分布は中心軸で最小で、粉体ジェット外端に向かって増加し、最大値を示した後に減少する傾向を示す。これに対して、 $v_{z \max}$ が v_g から離れる z/D (図 6 (a) 中の $z/D = 294.3, 437.1$) では、変動速度は平坦な部分が広がる傾向を示す。粉体ジェットの変動速度には粒子間衝突などが影響するといえる。前述のように、 $v_{z \max}$ が v_g とほぼ等しい z/D では、粒子間衝突による速度減衰も小さいために変動速度が小さくなったものといえる。一方、 $v_{z \max}$ が v_g から離れる z/D の領域や r/D が大きくなると、粒子群の不均一分散による落下速度の変化や粒子間衝突による速度の減衰が起こるため、変動速度が増加すると考えられる。さらに、ジェット外端付近では、粒子濃度が小さく、単一粒子の運動状態に近づく

Fig.7 Relation between m_p and m_{pe} of LG and SG particles

Fig.6 (c) Dimensionless axial fluctuation velocity profiles of SG particles for $m_p = 12.3 \text{ g/s}$

ためにこれらの影響が減少すると推測できる。また、 m_p が大きく、 z/D が増加すると変動速度は増加する傾向が見られた。

3.3 粉体ジェットの数密度分布

数密度 n は、粉体ジェットが気流に与える単位体積あたりの流体抵抗に影響する。そこで、本研究では、 n を P.D.A. により測定した。また、実験で得られた数密度の妥当性を確認するために、各断面での粉体ジェットの質量流量 m_{pe} を次式で算出した。

$$m_{pe} = \frac{\pi^2 \rho_p d_p^3}{3} \int_0^{r_p} v_z(r) n(r) r dr \quad (1)$$

ここで、 n は本実験で測定した数密度、 v_z は粉体ジェットの軸方向速度、 r_p は粉体ジェットの外端半径である。粉体の質量流量は各断面で一定であるので、式 (1) による m_{pe} とロードセルによる実験を比較することで、

Fig.8 Relation between $n_{\max}$ and z/D of LG and SG particles

Fig.9 Dimensionless number density profiles of LG particles for $m_p=12.4\text{g/s}$

P.D.A. による数密度の測定値を検証できる。

図7に、ロードセルによる測定値 m_p と式(1)で算出した粉体ジェットの質量流量 m_{pe} の関係を示す。ここで、測定はLG粒子とSG粒子に対して行い、それぞれの z は80mm, 180mm, 530mm, 1030mmおよび1530mmと80mm, 180mm, 530mmである。ただし、 m_p が5.65g/sと12.3g/sの場合のSG粒子では、粒子濃度が高かったため測定できなかった。図中の点線は m_p に対する $\pm 20\%$ の誤差範囲を示す。図より、 m_{pe} は m_p に対してばらついてはいるが、質量流量のオーダーはほぼ一致する。この結果から、本実験で得られた n の値はある程度妥当なものといえる。

図8に、LG粒子とSG粒子の、中心軸上数密度 n_{axis} と z/D の関係を示す。図より、 n_{axis} は z/D の増加とともに減少する。これは、 z/D の増加とともに、粒子速度が増加することと横方向への拡散が原因であるといえる。ま

Fig.11 Assumed axial velocity profiles of the entrained air by SG particles for m_p is 1.65g/s

Fig.10 Dimensionless number density profiles of SG particles for $m_p=1.65\text{g/s}$

た、LG粒子の n_{axis} は、 m_p の大きいものほど大きい。さらに、ほぼ同じ m_p でのSG粒子の z に対する n_{axis} の減少はLG粒子と比較して小さい。これらの結果は、質量流量が同じで粒子直径が小さい場合や粒子直径が同じで質量流量が増加する場合の数密度の増加を表している。3.1節で述べたように、これらの条件では、数密度の増加によって粒子群が気流に与える力が増加すると推測できる。このため、気流速度も増加し、粒子速度に影響を与えたといえる。

図9～10に、LG粒子とSG粒子の数密度分布を示す。ここで、 m_p はLG粒子が12.4g/s, SG粒子が1.65g/sである。また、図中の縦軸は n_{axis} で、横軸は D で無次元化した。両図より、数密度分布は中心軸付近でピークを取り、ジェット外端に向かって急速に減少することが分かる。また、 z/D が増加すると、 n/n_{axis} の分布形が横方向に広がっている。これは、 z/D の増加による粉体ジェッ

Fig.12 Comparison between m_d/m_p and z/D of LG, SG and PS particles

トの拡散が原因である。本実験範囲では、いずれの m_p や z/D においても同様の傾向を示した。

3・4 粉体ジェットによる巻き込み空気

LG粒子, SG粒子およびPS粒子による巻き込み量の推定と空気の巻き込みに対する粒子物性の影響について述べる。粉体ジェットにより誘起された気流速度を, $u_z=v_z-v_s$ と置けるとすれば⁽⁵⁾, 粉体ジェットにより巻き込まれる空気の質量流量 m_a は次式で計算できる。

$$m_a = 2\pi\rho_a \int_0^\infty u_z(r) r dr = 2\pi\rho_a \int_0^\infty \{v_z(r) - v_s\} r dr \quad (2)$$

図11に、上述の仮定による、SG粒子の u_z の速度分布を示す。ここで、 m_p は1.65g/sである。 u_z は z/D の増加とともに増加し、中心軸で最大で粉体ジェット外端に向かって減少する傾向を示す。この傾向は、LG粒子の気流速度と同様である⁽⁷⁾。また、 u_z は d_p , z/D や m_p を変化した場合でも同様の分布形を示した。ただし、図中の z/D が437.1の場合では、粒子速度の減速領域であるために、 u_z が中心軸付近で減少した。さらに、 d_p が小さい場合や m_p の増加とともに u_z は増加する傾向を示した。

図12に、各粒子の式(2)による m_a と z の関係を示す。図中の縦軸と横軸は、それぞれ、各粒子の質量流量 m_p とオリフィス直径 D で無次元化している。図より、 m_a/m_p は、粒子直径や密度に依存せず、 z/D の増加とともにほぼ一定の割合で増加する傾向を示した。このことから、粉体ジェットにより誘起される気流速度分布が粒子物性によらず相似形を得ることが推測される。

4. 結 論

容器底部の孔から落下する粉体ジェットの落下速度を位相ドップラー流速計によって測定し、以下の結果を得た。

(1) オリフィス出口部から排出された粉体ジェットの中心軸上速度は、落下距離が小さい場合に、粉体の質量流量や粒子直径、粒子密度によらず、流体抵抗を無視した場合の単一粒子の自由落下速度にほぼ等しい。そして、SG粒子では、落下距離が十分大きくなると、単一粒子の沈降速度より大きい速度の最大値に達した

後、最終的に単一粒子の終末沈降速度に漸近する傾向を示した。また、粒子直径が小さい場合や質量流量が大きい場合に、粉体ジェットの中心軸上速度の単一粒子の終末沈降速度に対する比が増加することが明らかとなった。

(2) 粉体ジェットの軸方向変動速度分布は中心軸において最小となり、ジェット外端に向かって増加し、最大値に達した後に減少する。また、質量流量が小さい場合の変動速度は、落下距離が増加すると、平坦な分布が広がる傾向を示す。

(3) 粉体ジェットの数密度分布は中心軸付近で一つのピークを持ち、ジェット外端付近に向かって急速に減少する。また、粒子直径が小さい場合の中心軸上数密度は粒子直径が大きいものより増加する。

(4) 粉体ジェットにより誘起された気流の無次元質量流量は粒子直径や密度によらず落下距離の増加とともにほぼ一定の割合で増加すると推定された。

文 献

- (1) Boothroyd, R. G., *Flowing gas-solids suspension*, (1971), 24-34, Chapman and Hall Ltd.
- (2) Hemeon, W. C. L., *Plant and Process Ventilation*, (1955), 120-161, The Industrial Press.
- (3) Cooper, P., P. C. Arnold, *KONA*, **13**(1995), 125-134.
- (4) Noymer, P. D., Glucksman, *Chem. Eng. Sci.*, **55**(2000), 5283-5289.
- (5) 尾形公一郎・船津勝也・富田侑嗣, 日本機械学会論文集B編, **65-633**(1999), 1629-1635.
- (6) Ogata, K., Funatsu, K., Tomita, Y., *Powder Technology*, **115-1**(2001), 90-95.
- (7) Ogata, K., Funatsu, K., Tomita, Y., *KONA*, **19**(2001), 223-231.
- (8) 尾形公一郎・他3名, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.3, (2002), 143-144.
- (9) Ogata, K., Tomita, Y., *Proceeding of 2nd Asian Particle Technology Symposium 2003*, Vol.2 (2003), 407-413.
- (10) 尾形公一郎・他3名, 日本機械学会九州支部第54期講演論文集, No.018-1, (2001), 73-74.