研究報告

固気混相流中におかれた物体のまわりにおける 粉粒体粒子のたい積現象

A Study on the Amount of the Deposit of Solid Particles Around
an Obstacle in a Horizontal Duct

狩野 武* 藤井 史郎*
Takeshi Kano Shiro Fujii

藤井 謙治* 板倉 敏文*
Kenji Fujii Toshifumi Itakura

1. 緒 言

固気混相流を扱う装置、たとえば空気輸送あるいは集じん装置などでは、管路中、特にダンパ、切換え弁、管の接続部などで粉粒体がたい積しやすい。この現象は円滑な輸送を妨げ圧力損失を増大させ、さらにはなほだしの場合には機器の作動不良、たい積物の固結を来し運転不良を招くことになる。

特に高級食品工業あるいは石油化学工業などでは製品の品質保持のために輸送物の残留は皆無であることが要求される。

したがって装置の設計にあたっては、円滑な定常的連続輸送が可能であるためにはもとより、事故の防止、輸送物の品質保全のためにも、たい積を極少ないし皆無にするように万全の考慮を払うことが必要である。

ところが、管内における粒子のたい積には流体力学的にも物性的にもいろいろの要素が関係することが経験されていて、その実態を把握しにくく、また理論的にも扱

いにくい現象である。この方面の研究例は寡聞にしてまだ定説を見ない。

筆者らは以上のような観点から、経済的かつ円滑な輸送をつづけるための限界条件を見出す一連の研究の一環として、まず管路中に障害物を置き、そのまわりにおける粉粒体のたい積量と障害物の形状ならびに輸送速度との関係について次元解析と実験を行なった。その結果2, 3の知見を得たのでここに報告する。

2. 次元解析

まず、Fig. 1に示すように、混相流を輸送する管内に障害物として平板を任意の角度で置いた場合について考える。このとき物体のまわりにおける粉粒体のたい積現象に関する物理量として、次にあげるものが考えられる。

- l : ダクト中の障害物の長さ
- D_0 : ダクトの相当直径
- θ : ダクト底面と障害物(平板)とのなす角
- d_s : 粉粒体の重量平均径
- ρ_s : 粉粒体の真密度
- ϕ_r : 粉粒体の安息角
- ξ_i : 粉粒体の内部摩擦係数
- U_a : ダクト中の空気速度
- μ_a : 空気の粘性係数
- ρ_a : 空気の密度
- μ_s : 混合比
- g : 重力加速度

さらに、測定した粉粒体のたい積量 W_ϕ を無次元で表示するため、基準たい積量 W_ϕ を考える。これは Fig. 2に示すように高さ l 、底面とのなす角 ϕ_r の二等辺三角形

Fig. 1 障害物

昭和49年8月2日受理

* 静岡大学工学部化学工学科 (〒 432 浜松市城北 3-5-1)

TEL 0534-71-1171

Fig. 2 W_ϕ

で形づくられるたい積量に等しい。無次元化されたたい積量 W は(1)式で表わされる。

$$W = \frac{W_s}{W_\phi} = \frac{S}{l^2 \tan(\pi/2 - \phi_r)} \quad \dots\dots(1)$$

ここで S は、実際のたい積の側面の投影面積である。

このたい積無次元量 W は、次元解析によれば(2)式であらわされるような各無次元項を含んだ関数で表現できることになる。

$$W = f_1 \left(R_e, F_r, \frac{\rho_a}{\rho_s}, \frac{l}{D_e}, \frac{d_s}{D_e}, \frac{\theta}{\phi_r}, \xi_i, \mu_s \right) \quad \dots\dots(2)$$

R_e, F_r はともに長さの単位を粒子径 d_s であらわしたものである。 ρ_a/ρ_s は流体と粒子の密度比、 l/D_e は障害物の長さと同相当径の比、 d_s/D_e は粒子径と同相当径の比でありこれは粉粒体たい積床表面の粗さの影響を表わす無次元項と考えられる。

ダクトの寸法、実験に用いた試料の種類、粒径などが一定の場合は(2)式は(3)式のように簡略化される。

$$W = f_2 \left(R_e \cdot F_r, \frac{l}{D_e}, \frac{\theta}{\phi_r}, \mu_s \right) \quad \dots\dots(3)$$

なお、粉粒体のたい積量は、粒度分布、粒子表面の性状、管壁や障害物の性状、流体の湿度、温度、圧力などにも影響されるであろうがここではそれらの因子による影響は一定と考えている。

3. 試料、実験装置および実験方法

3.1 試料

実験にあたって粉体としてアルミナを用いた。これは比較的粒度が均一に近く、付着性や吸湿性も少なく、物理・化学的性質が安定しているといった理由のためである。

Fig. 3は実験に使用したアルミナの顕微鏡写真で、物

Fig. 3 アルミナの顕微鏡写真 (1目盛 10μ)

Table 1 アルミナの物性値

物 性		測 定 値
壁面摩擦角	ϕ_w	18.5°
内部摩擦角	ϕ_i	9.40°
安息角	ϕ_r	41.0°
崩壊角	ϕ_f	13.2°
真密度	ρ_s	$4.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ゆるめかさ密度	ρ_s'	$0.955 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
かためかさ密度	ρ_s''	$1.452 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
重量平均粒子径	d_s	27.4μ

Fig. 4 アルミナの粒度分布

理的性質は Table 1^{a)} に示すとおりであり、粒度分布は Fig. 4^{b)} のとおりである。

3.2 実験装置

Fig. 5に実験に用いた装置の概略を示す。空気源には、ターボブロワー① (3.7kW, 1700mmAq) を使用し、バルブ②および③で流量を調節する。一方、ホッパー⑤からバルブ⑥を通り落下してくる粉体の供給量は、クリップ⑦で調節する。エジェクター⑧によって定量的に気流に混入された粉粒体は、テストダクト⑨を輸送される。

ダクトを通過した粉体は、サイクロン⑪とバッグフィルター⑬で捕集される。

テストダクト⑨は、厚さ 3 mm の透明アクリル板を用いた角ダクトであり、ダクト断面内寸法は、20×100mm

- a) $\phi_r, \phi_f, \rho_s', \rho_s''$ については、Powder Tester, ρ_s は、空気比較式比重計によって測定した。
- b) 粒度分布は、光透過式粒度分布測定器によって測定した。

Fig. 5 装置図

Table 2 実験条件

項目	操作条件
l [m]	3×10^{-2} , 5×10^{-2}
θ [radian]	$\pi/6$, $\pi/4$, $\pi/3$, $\pi/2$
μ_s [—]	0.1, 0.2, 0.5
U_a [m/sec]	5, 10, 15, 20, 25, 30

m, 長さ2mである。ダクトには障害物取付部⑩を設けてある。ダクト中に障害物として、長さおよび角度を変えた亜鉛びき鉄板製の平板を設けた。

なお、テストダクトの背後に光源としてけい光燈⑭を置き、前方には撮影用のカメラ⑮を設置した。

3.3 実験方法

障害物の長さ l , ダクト底面とのなす角 θ , さらに混合比 μ_s , 空気速度 U_a は, Table 2に示すように選んだ。

粉粒体たい積量の測定はつぎのようにした。まずダクト中に障害物を取り付け所定の空気速度と混合比に調節した後, たい積量が定常になるまで待ち, 粉体のたい積により生じた陰影を写真撮影する。つぎにフィルムを投影して, 画像にあらわれた陰影部の面積を測定する。この場合, たい積部の側面積 S をプランメーターで測定すれば, $S \times (\text{ダクト幅}) \times (\text{かさ密度})$ でたい積量が求まる。混合比はエジェクターによって供給した粉粒体量とその時間から計算して求めた。

4. 考 察

4.1 実験式

実験では空気速度の程度によって, たい積量はもとよりその形状が変わることが観察された。一例として Fig. 6に $\theta = \pi/2$, $l = 50\text{mm}$ の場合について, たい積の形が変化する状態を示す。空気速度 U_a が小さい場合には, 比較的障害物の後にも多量にたい積するが, U_a が増加し20 m/sec. 程度になると障害物の後に多量にたい積する。後方にたい積するのは, 障害物によって生じる死水領域

Fig. 6 たい積状態 $l=50\text{mm}$ $\theta=\pi/2$

Fig. 7 (a) 混合比とたい積無次元量

Fig. 7 (b) 混合比とたい積無次元量

が成長して, この領域に飛び込んだ粒子が, 気流から運動エネルギーを与えられることがなく, そのままたい積するためと考えられる。さらに U_a が増すと逆にたい積

Fig. 8 $Re \cdot Fr$ とたい積無次元量

Fig. 9 $Re \cdot Fr$ とたい積無次元量

量は減っている。これは障害物の後方に生じる気流の乱れや渦が著しくなって粒子を洗い流すためと考えられる。

Fig. 7 (a), (b) では、たい積無次元量 W におよぼす混合比の影響を調べた結果を例示する。この図によればたい積無次元量 W は $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲ではほぼ $\mu_s^{1.5}$ に比例していることがわかる。しかし $\theta = \pi/6$ においては $\mu_s^{0.6}$ に比例しているので一般的には $\mu_s^{u(\theta)}$ に比例すると考えられる。

Fig. 8 は、 $W/\mu_s^{1.5}$ と $Re \cdot Fr$ の関係を示したものである。 θ が等しいときには障害物の長さ l にかかわらず、たい積無次元量 W は等しくなる。これはたい積した部分の幾何学的相似性から容易に推察される。すなわちたい積量 W_s は障害物の長さ l^2 に比例することになるので(1)式から W は l にかかわらない値となることが推論できる。これはFig. 8の実験結果と矛盾しない。またFig. 8では、 $W/\mu_s^{1.5}$ が θ/ϕ_r にほぼ比例することも推察できる。

Fig. 9 は、 $W/(\mu_s^{u(\theta)} \cdot \theta/\phi_r)$ と $Re \cdot Fr$ の関係を示したものである。この図で表わされるようにたい積無次元量は、つぎのようになる。

1) $Re \cdot Fr < 7 \times 10^3$ の範囲ではほぼ $(Re \cdot Fr)^{-1.0}$ に比

例する。

2) $7 \times 10^3 < Re \cdot Fr < 4.5 \times 10^4$ の範囲ではほぼ $(Re \cdot Fr)^{0.5}$ に比例している。

3) $4.5 \times 10^4 < Re \cdot Fr$ の範囲ではほぼ $(Re \cdot Fr)^{-1.0}$ に比例する。

いいかえれば、たい積量は、空気速度 U_a が 8m/sec 以下の場合には U_a^2 にしたがって減少し、 $8 < U_a < 20$ m/sec の中間域では U_a に比例して増加する、さらに U_a が増せば再び U_a^2 にしたがって減少するという極値をもった関数になる。

以上の結果から、著者らの実験にもとづく実験式として、 $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2$ において(4)式が得られる。

$$W = K \cdot (Re \cdot Fr)^n \cdot \left(\frac{\theta}{\phi_r} \right) \cdot \mu_s^{1.5} \quad \dots\dots(4)$$

ただし、

$$Re \cdot Fr < 7 \times 10^3; \quad K = 8.0 \times 10^5 \quad n = -1.0$$

$$7 \times 10^3 < Re \cdot Fr < 4.5 \times 10^4;$$

$$K = 1.5 \times 10^{-2} \quad n = 0.5$$

$$4.5 \times 10^4 < Re \cdot Fr; \quad K = 1.5 \times 10^5 \quad n = -1.0$$

$\theta = \pi/6$ の場合も実験を行なったが、Fig. 9 に示すように(4)式では表現できない。障害物の角度 θ が小さくなれば、たい積量の空気速度による変化は顕著には現われない。

これらの現象は管路中に置かれた障害物によって生じる死水領域内の渦および死水領域を囲む不連続面に生じる渦の盛衰と深いかかわりをもつと考えられる。

4.2 障害物前後のたい積量比

障害物前部のたい積量 W_1 と後部のたい積量 W_2 との

Fig. 10 障害物の前後におけるたい積量の比

比 W_1/W_2 は、Fig.10 に示すように $R_e \cdot F_r$ の値が大きいほど減少する傾向がみられる。すなわち、流速が増せば障害物の後部にたい積する割合が大きくなる。

しかし図中の $R_e \cdot F_r = 10^5$ の測定点では W_1/W_2 の値は $\theta = \pi/2, \pi/3, \pi/4$ のいずれの場合にもやや大きな値を示している。これは障害物後部に生じる強い渦の乱れのためにたい積しようとする粉体が吹き流されて、後部たい積量 W_2 が減少するためと考えられる。

また、Fig.10に示すように W_1/W_2 は、 $(\theta/\phi_r)^6$ にほぼ比例している。

3.1 でも述べたようにたい積量はほぼ (θ/ϕ_r) に比例しているので、これらのことから、 θ が小さくなればたい積量そのものは減少するが障害物の後部にたい積する割合が大きくなることを表わしている。

5. 結 論

粉粒体混相流の限界条件に関する研究の一環として、

物体のまわりにおける粉粒体粒子のたい積現象を調べるために次元解析とアルミナ粒子を用いた実験的研究を行った。その結果は次のように要約される。

1) 粉粒体たい積量は、障害物の長さ l の平方に比例する。したがって(1)式で示される著者らのたい積量無次元化は妥当である。

2) 粉粒体たい積量は、混合比 μ_s の $3/2$ 乗に比例する。障害物(平板)の角度 θ が小さくなればこの指数が小さくなる傾向がある。

3) 粉粒体たい積量は、 $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2$ の範囲で θ に比例する。

4) $R_e \cdot F_r < 7 \times 10^3$, $4.5 \times 10^4 < R_e \cdot F_r$ の範囲で粉粒体たい積量は、空気速度 U_a の -2 乗に比例する。また $7 \times 10^3 < R_e \cdot F_r < 4.5 \times 10^4$ の範囲では、 U_a の 1 乗に比例して増加する。

5) 空気速度の増加にしたがって、障害物の後にたい積する割合が増加する。

記 号		記 号	
D_e : 相当直径	[m]	W_2 : 障害物後部たい積量	[kg]
d_s : 粒子径	[μ] [m]	θ : 障害物の角度	[radian]
F_r : フルード数 ($=U_a/\sqrt{d_s \cdot g}$)	[-]	μ_a : 空気の粘性係数	[kg/m $\cdot$ sec]
g : 重力加速度	[m/sec 2]	μ_s : 混合比	[-]
K : 定数	[-]	ξ_i : 粉粒体の内部摩擦係数	[-]
l : 障害物の長さ	[m]	ρ_a : 空気の密度	[kg/m 3]
n : 指数	[-]	ρ_s : 粉粒体の真密度	[kg/m 3]
R_e : レイノルズ数	[-]	ρ_s' : 粉粒体のゆるめかさ密度	[kg/m 3]
S : たい積部側面積	[m 2]	ρ_s'' : 粉粒体のかためかさ密度	[kg/m 3]
U_a : 空気速度	[m/sec]	ϕ_f : 粉粒体の崩壊角	[$^\circ$]
W : たい積無次元量	[-]	ϕ_i : 粉粒体の内部摩擦角	[$^\circ$]
W_s : たい積量	[kg]	ϕ_r : 粉粒体の安息角	[radian] [$^\circ$]
W_ϕ : 基準たい積量	[kg]	ϕ_w : 粉粒体の壁面摩擦角	[$^\circ$]
W_1 : 障害物前部たい積量	[kg]		

Author's abstract

A Study on the Amount of the Deposit of Solid Particles Around an Obstacle in a Horizontal Duct

by

Takeshi Kano, Shiro Fujii, Kenji Fujii, Toshifumi Itakura
(Department of Chemical Engineering, Shizuoka University)

An experimental study was carried out to investigate the amount of the deposit of solid particles around an obstacle concerning with its shape and air velocity in a horizontal duct.

A plate whose length and angle to the horizontal surface were variable was placed in the duct which had dimensions of 20 $\times$ 100mm in section and 2m in length. Alumina particles were used as the sample, and their mean diameter was 27.4 μ .

As the conclusion of this experiment, the following results were obtained.

In the case of $\pi/4 \leq \theta \leq \pi/2$, the amount of the deposit of solid particles around the plate, w , increased in proportion to $l^2, \mu_s^{1.5}$ and θ/ϕ_r , and was represented by the following equation :

$$W = K \cdot (R_e \cdot F_r)^n \cdot (\theta/\phi_r) \cdot \mu_s^{1.5}$$

where, l : length of plate

θ : angle of plate to horizontal surface

μ_s : mixing ratio of alumina in air flow

ϕ_r : angle of repose of alumina

R_e : Reynolds number

F_r : Froude number

K and n : constants given by,

$$R_e \cdot F_r < 7 \times 10^3; \quad K = 8.0 \times 10^3, \quad n = -1.0$$

$$7 \times 10^3 < R_e \cdot F_r < 4.5 \times 10^4; \quad K = 1.5 \times 10^{-2}, \quad n = 0.5$$

$$4.5 \times 10^4 < R_e \cdot F_r; \quad K = 1.5 \times 10^7, \quad n = -1.0$$

List of figures and tables

Fig. 1 Obstacle in duct

Fig. 2 Standard deposits for dimensionless

Fig. 3 Optical micrograph of alumina

Fig. 4 Cumulative residue distribution of alumina

Fig. 5 Experimental apparatus

Fig. 6 Silhouette of deposit

Fig. 7 Relation between mixture ratio and deposits

Fig. 8 Relation between $R_e \cdot F_r$ and nondimensional deposits

Fig. 9 Relation between $R_e \cdot F_r$ and nondimensional deposits

Fig. 10 Specific ratio of deposits

Table 1 Properties of alumina

Table 2 Experimental conditions